

VERSÃO PÚBLICA

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Geologia



**Estudos de investigação geológica no projeto de barragens de aterro e análise  
de risco de projeto**

**Estudo de caso - Barragem de Moamba-Major**

**Filipa Cacilhas**

Estágio

Mestrado em Geologia Aplicada

Especialização em Geologia de Engenharia

**2015**



Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Geologia



**Estudos de investigação geológica no projeto de barragens de aterro e análise  
de risco de projeto**

**Estudo de caso - Barragem de Moamba-Major**

**Filipa Cacilhas**

Estágio

Mestrado em Geologia Aplicada

Especialização em Geologia de Engenharia

Orientadores:

Mónica Gisela Monteiro da Silva

Fernando Manuel Silva da Fonseca Marques

**2015**



## **AGRADECIMENTOS**

A autora da presente tese quer deixar os seus agradecimentos aos seus orientadores externo e interno, Doutora Mónica Silva e Doutor Fernando Marques pela orientação, disponibilidade e apoio ao longo de todo o percurso.

À empresa COBA Portugal – Consultores de Engenharia e Ambiente S. A. pela possibilidade de conciliação entre o horário de trabalho e as aulas do mestrado.

E por último à minha família e amigos pelo apoio que me deram.



# **ESTUDOS DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA NO PROJETO DE BARRAGENS DE ATERRO E ANÁLISE DE RISCO DE PROJETO ASSOCIADA**

## **CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DE MOAMBA-MAJOR**

### **RESUMO**

Esta dissertação pretende realizar uma síntese sobre a prática atual em Portugal no que se refere aos estudos de investigação geológica no projeto de barragens de aterro. Apresenta-se um resumo do conjunto de trabalhos de prospeção geológica e geotécnica, geralmente utilizados no reconhecimento das condições de fundação das barragens, seus órgãos hidráulicos, albufeira e manchas de empréstimo de materiais para a construção. Apresenta-se igualmente uma compilação do conjunto de ensaios laboratoriais de caracterização geológica e geotécnica dos materiais de fundação e de construção mais usados nas barragens. Concluindo-se com um conjunto de *checklists* a seguir na elaboração de um plano de investigação geológica para o projeto de barragens de aterro. Finaliza-se com um caso de estudo, sobre o projeto de uma barragem de aterro em Moçambique: Barragem de Moamba-Major, desenvolvendo-se o tema da análise de risco em projetos de barragens de aterro.

Palavras-chave: barragem de aterro, plano de prospeção geotécnica, análises de laboratório, análise de risco de projeto.

### **ABSTRACT**

The present work is intended to make a synthesis of the current practice in Portugal in what concerns the geological investigation studies in the project of embankment dams. It presents a summary of all the geological-geotechnical investigations generally used in the study of the conditions of the foundations of the dams, its hydraulic operation parts, reservoir and the construction materials source areas. It will also be presented a set of laboratory tests for geological-geotechnical characterization of the foundation and construction materials used in dams. The document will be concluded with a set of checklists to follow during the geological investigation for the embankment dam project and finishing with a case study of an embankment dam in Mozambique: the Moamba-Major Dam, developing the theme of risk analysis in embankment dam design.

Key-words: embankment dam, geotechnical prospection plan, laboratory tests, risk analysis in design.





## ÍNDICE DE TEXTO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	FATORES CRÍTICOS A INVESTIGAR PARA CADA TIPO DE BARRAGEM DE ATERRO .....	3
2.1	Aspetos Gerais.....	3
2.2	Tipos de Barragens de Aterro .....	3
2.3	Classificação de Barragens.....	6
2.4	Estudos e Fatores Críticos a Considerar .....	7
2.5	Pontos a Reter.....	8
3	TRABALHOS DE PROSPECÇÃO A REALIZAR PARA O PROJETO DE BARRAGENS DE ATERRO .....	9
3.1	Aspetos Gerais.....	9
3.2	Ensaio de Refração Sísmica .....	9
3.3	Ensaio de <i>Cross-hole</i> .....	10
3.4	Sondagens à Rotação .....	11
3.5	Sondagens Destrutivas ou de Roto-percussão.....	12
3.6	Poços/Valas de Reconhecimento .....	12
3.7	Galerias.....	13
3.8	Ensaio <i>in situ</i> .....	13
3.8.1	<i>Standart Penetration Test</i> (SPT).....	14
3.8.2	Ensaio de Piezocone com Medição da Pressão Intersticial (CPTu) .....	14
3.8.3	Ensaio pressiométrico.....	15
3.8.4	Ensaio dilatométrico.....	16
3.8.5	Ensaio de corte rotativo <i>in situ</i> ( <i>Vane test</i> ).....	17
3.8.6	Ensaio de permeabilidade <i>LeFranc</i> .....	17
3.8.7	Ensaio de permeabilidade <i>Lugeon</i> .....	18
3.8.8	Ensaio de bombagem.....	18
3.9	Medições Piezométricas.....	19
3.10	Pontos a Reter.....	19
4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO A REALIZAR PARA O PROJETO DE BARRAGENS DE ATERRO .....	21
4.1	Aspetos Gerais.....	21
4.2	Ensaio de Laboratório Sobre Solos.....	22
4.2.1	Análises Granulométricas com Sedimentação.....	22
4.2.2	Limites de Atterberg .....	23
4.2.3	Massa Volúmica / Peso Volúmico / Peso Volúmico das Partículas .....	23
4.2.4	Teor em Água Natural .....	24
4.2.5	Análise Mineralógica por Difractometria de Raios-X.....	24

4.2.6	Azul de Metileno.....	25
4.2.7	Equivalente de Areia.....	25
4.2.8	Proctor Normal .....	25
4.2.9	Expansibilidade .....	26
4.2.10	Corte Direto.....	26
4.2.11	Edométrico.....	27
4.2.12	Corte Triaxial.....	28
4.2.13	Dispersividade.....	28
4.2.14	Permeabilidade.....	29
4.2.15	Análises Químicas.....	29
4.3	Ensaio de Laboratório Sobre Rochas.....	30
4.3.1	Porosidade, Peso Volúmico e Absorção de Água.....	30
4.3.2	Índice de Fragmentabilidade.....	31
4.3.3	Índice de Degradabilidade.....	31
4.3.4	Ensaio de Abrasividade <i>Cerchar</i> .....	32
4.3.5	Expansibilidade .....	32
4.3.6	Desgaste em Meio Húmido ( <i>Slake-Durability Test</i> ) .....	32
4.3.7	Desgaste <i>Los Angeles</i> .....	33
4.3.8	Compressão p/ Carga Pontual ( <i>Point Load</i> ) .....	33
4.3.9	Resistência ao Esmagamento .....	34
4.3.10	Compressão Simples ou Uniaxial .....	34
4.3.11	Ensaio Brasileiro.....	35
4.3.12	<i>Micro-Deval</i> .....	35
4.3.13	Deslizamento de Diaclases .....	36
4.3.14	Velocidade de Propagação das Ondas Elásticas .....	36
4.3.15	Análise Petrográfica.....	37
4.3.16	Reatividade do Tipo Álcalis-Sílica.....	37
4.4	Ensaio de Determinação da Agressividade da Água .....	37
4.5	Normas/Especificações dos Ensaio de Laboratório .....	38
4.6	Pontos a Reter.....	41
5	ANÁLISE, AVALIAÇÃO E GESTÃO DO RISCO EM FASE DE PROJETO.....	43
6	CHECKLISTS.....	43
7	CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DE MOAMBA-MAJOR.....	43
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....	45
9	BIBLIOGRAFIA .....	47

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Perfil-tipo de barragem homogénea.....	4
Figura 2.2 – Perfil-tipo de barragem homogénea modificada com dreno de chaminé e dreno horizontal.....	4
Figura 2.3 – Perfil-tipo de barragem homogénea modificada com dreno horizontal.....	5
Figura 2.4 – Perfil-tipo de barragem homogénea modificada com dreno de pé de talude.....	5
Figura 2.5 – Perfil-tipo de barragem zonada com núcleo interno .....	5
Figura 2.6 – Barragem zonada com talude de montante impermeável e talude de jusante de enrocamento.....	6

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Determinação das classes de barragem segundo o Regulamento de Segurança de Barragens (2007) .....	6
Tabela 4.1 – Ensaios de laboratório e respetivas normas.....	38



## 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação pretende realizar uma síntese sobre a prática atual em Portugal no que se refere aos estudos de investigação geológica no projeto de barragens de aterro. Apresenta-se em resumo o conjunto de trabalhos de prospeção geológica e geotécnica geralmente utilizados no reconhecimento das condições de fundação das barragens, seus órgãos hidráulicos, albufeira e manchas de empréstimo de materiais para a construção. Apresenta-se igualmente uma compilação do conjunto de ensaios laboratoriais de caracterização geológica e geotécnica dos materiais de fundação e de construção mais usados no projeto de barragens. Concluindo-se com um conjunto de *checklists* a seguir na elaboração de um plano de investigação geológica para o projeto de barragens de aterro. Finaliza-se com um caso de estudo, sobre o projeto de uma barragem de aterro em Moçambique: Barragem de Moamba-Major, desenvolvendo-se o tema da análise de risco em projetos de barragens de aterro.

A tese será dividida em oito capítulos principais. O Capítulo 1 consiste na presente Introdução. O Capítulo 2 apresentará um sumário das principais preocupações geotécnicas/fatores críticos a investigar para cada tipo de barragem de aterro, à luz do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007). São esses fatores críticos que orientam os planos de investigação geológica e geotécnica realizados para cada tipo de barragem. Apresenta-se ainda a organização corrente dos planos de investigação elaborados.

No Capítulo 3 será apresentada a compilação e descrição dos principais trabalhos de prospeção geotécnica realizados para o projeto de barragens de aterro, com as respetivas vantagens, limitações e normas a cumprir para cada um dos métodos.

No Capítulo 4 apresenta-se o sumário dos ensaios de laboratório geralmente realizados, as normas portuguesas ou procedimentos (usualmente editados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil) que devem ser seguidos em cada caso e qual a informação de cada ensaio retirada para o projeto.

No Capítulo 5 desenvolve-se o tema da análise de risco em projetos de barragens, efetuando-se uma proposta de avaliação do risco aplicada ao caso de estudo no Capítulo 7.

No Capítulo 6 apresenta-se como conclusão um conjunto de *checklists* a seguir na elaboração de um plano de investigação geológica para o projeto de barragens de aterro.

O Capítulo 7 descreve também o plano de prospeção geotécnico (trabalhos de prospeção e ensaios de laboratório) executado em fase de Projeto Base de uma barragem de aterro em Moçambique, denominada barragem de Moamba-Major.

Para finalizar, no Capítulo 8 apresentam-se as considerações finais e algumas ideias de desenvolvimento de trabalhos académicos futuros.



## **2 FATORES CRÍTICOS A INVESTIGAR PARA CADA TIPO DE BARRAGEM DE ATERRO**

### **2.1 Aspetos Gerais**

Segundo o Decreto-Lei n.º 344/2007, as barragens, no sentido geral de estrutura propriamente dita, sua fundação, zona vizinha a jusante, órgãos de segurança e exploração e albufeira, são necessárias para uma adequada gestão das águas, nomeadamente para o abastecimento de água às populações, a rega, o controlo de cheias, a produção de energia, as atividades turísticas e industriais e a navegação.

Neste capítulo serão identificados, do ponto de vista geológico, os fatores críticos a investigar dependendo dos vários tipos de barragem de aterro.

### **2.2 Tipos de Barragens de Aterro**

As barragens de aterro são o tipo mais comum de barragem. A construção do corpo da barragem faz-se utilizando unicamente materiais no estado natural, geralmente explorados próximo do local, sem a adição de materiais aglutinantes e com um mínimo de intervenção humana (Quintela, 1990). Podem ser classificadas como de terra ou de enrocamento.

Uma barragem é denominada de terra, se o seu corpo for constituído em mais de 50% por solo compactado. As barragens de terra podem ser homogéneas ou zonadas, como será descrito posteriormente.

Uma barragem de aterro é classificada como de enrocamento se mais de 50% do volume do seu corpo for constituído por enrocamento (Quintela, 1990).

As barragens de enrocamento caracterizam-se por, na sua construção, incluírem uma ou mais zonas compostas por maciços de materiais granulares (partículas de dimensões variáveis e com permeabilidade global significativa), que asseguram a estabilidade da estrutura. E por uma zona impermeável, que poderá ser constituída por uma cortina construída sobre o paramento de montante (betão armado, betão asfáltico, chapa de aço ou outro material impermeável) ou por um núcleo impermeável, mais frequentemente constituído por solo (adaptado Quintela, 1990).

Estas barragens são muito frequentes em climas tropicais, devido à sua constituição adequada para resistir a longos períodos de chuva intensa (adaptado de U.S.D.I., 1987).

Os tipos de perfis mais correntes e alguns condicionalismos que levam à escolha do tipo de perfil adotado, são: barragem homogénea, barragem homogénea modificada e barragem zonada.

#### Barragem homogénea

Constituída praticamente por um único material, com permeabilidade suficientemente reduzida para só permitir níveis aceitáveis de percolação. As indinações dos taludes a montante e a jusante são por

regra, diferentes, tendo em vista adequarem-se aos diversos tipos de ações a que estes estão expostos.

No perfil homogêneo representado na Figura 2.1 é muito provável que na base do talude de jusante ocorram ressurgências, caso o aterro e a fundação não garantam a necessária estanquidade. A verificarem-se ressurgências, haverá forças de percolação que produzirão erosão tubular interna, pelo que é mais frequente recorrer a um perfil homogêneo modificado, como o representado na Figura 2.2 (Lança, 1997).

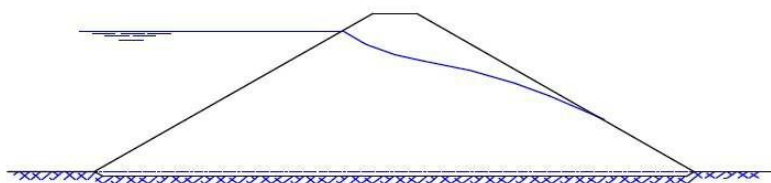


Figura 2.1 – Perfil-tipo de barragem homogênea

#### Barragem homogênea modificada

É constituída por um único material de muito baixa permeabilidade, sendo também empregue uma pequena percentagem de material permeável na construção de drenos para controlo da percolação, no corpo da barragem, o que permite taludes de jusante muito mais inclinados do que no caso da adoção de um perfil homogêneo (adaptado de Lança, 1997).

A Figura 2.2, Figura 2.3 e Figura 2.4 representam os diferentes sistemas de drenagem usualmente incorporados no perfil tipo de barragens homogêneas.

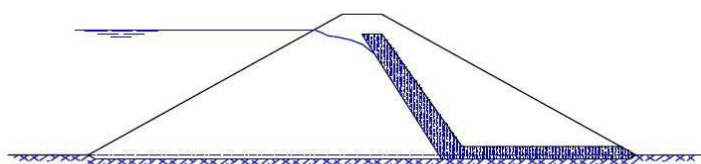


Figura 2.2 – Perfil-tipo de barragem homogênea modificada com dreno de chaminé e dreno horizontal

O sistema de drenagem apresentado na Figura 2.2 combina um dreno de chaminé com um dreno horizontal e é empregue para minorar os efeitos de possíveis defeitos de construção ou deficientes propriedades dos materiais disponíveis, tais como: má compactação, deficiente ligação entre as camadas ou a utilização de solos dispersivos (Lança, 1997).



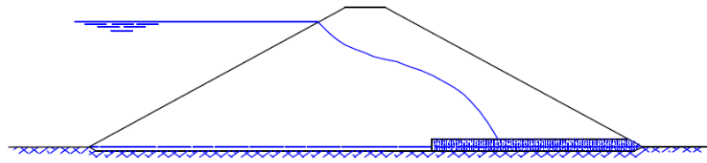


Figura 2.3 – Perfil-tipo de barragem homogênea modificada com dreno horizontal

O tipo de dreno apresentado na Figura 2.3 é empregue quando o material disponível para a construção dos drenos é bem graduado. Salientando-se que neste tipo de solução é necessário ter em atenção as forças de percolação entre o filtro, o aterro e a fundação (adaptado de Lança, 1997).

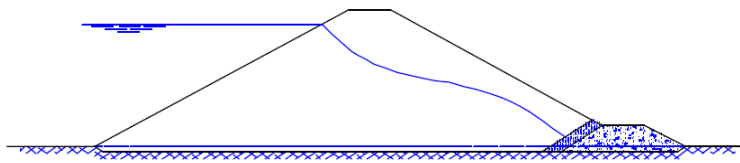


Figura 2.4 – Perfil-tipo de barragem homogênea modificada com dreno de pé de talude

A solução ilustrada na Figura 2.4 permite atuar na linha de saturação. Ela é escolhida ou indicada quando se dispõe de material com elevada granulometria para a construção do dreno (adaptado de Lança, 1997).

### Barragem zonada

A barragem zonada é formada por solos com características diferentes, utilizando-se o solo disponível menos permeável (coeficiente de permeabilidade menor) no núcleo central com função “vedante”, enquanto o solo mais permeável ou enrocamento é utilizado nos taludes (Figura 2.5) (adaptado de Lança, 1997).

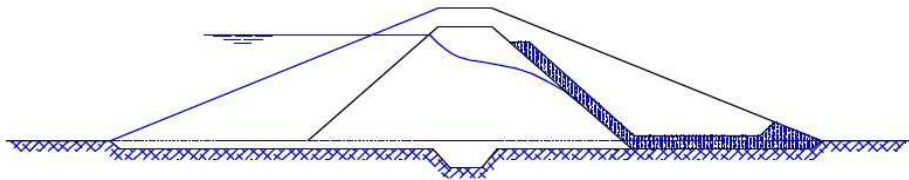


Figura 2.5 – Perfil-tipo de barragem zonada com núcleo interno

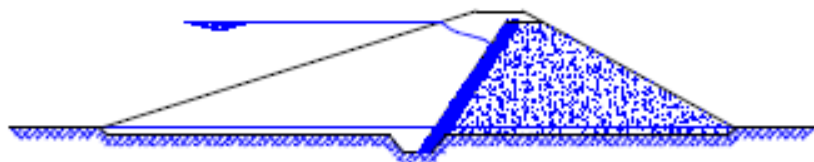


Figura 2.6 – Barragem zonada com talude de montante impermeável e talude de jusante de enrocamento

Também existem barragens zonadas que em vez de possuírem um núcleo central são constituídas por um talude a montante de material impermeável e um talude a jusante de material permeável com funções estruturais (Figura 2.6). A existência de um filtro que separa o material impermeável e o talude de jusante é fundamental para evitar fenómenos de erosão interna provocados por forças de percolação que tendem a arrastar os finos (adaptado de Lança, 1997).

### 2.3 Classificação de Barragens

De acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens publicado em Diário da República Decreto-Lei n.º 344/2007, a classificação das barragens considera os seguintes pontos:

1. *“Para efeitos do presente Regulamento, as barragens agrupam-se em função dos danos potenciais a elas associado, nas classes I, II e III, indicadas por ordem decrescente da gravidade dos danos.”*
2. *“A classificação referida no número anterior deve ter em conta as vidas humanas, bens e ambiente, de acordo com as regras constantes do anexo ao presente Regulamento e que dele faz parte integrante.”*

Estes pontos consideram essencialmente os potenciais danos que estas estruturas podem gerar em caso de rotura, e que põem em risco diversos alvos existentes a jusante das mesmas. Estão quantificados segundo a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Determinação das classes de barragem segundo o Regulamento de Segurança de Barragens (2007)

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou infra-estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenamento de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

O Regulamento é aplicado a todas as barragens (designadas por grandes barragens) que apresentem altura igual ou superior a 15 m, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até

à cota do coroamento, ou que apresentem altura igual ou superior a 10 m, cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm<sup>3</sup>.

Assim como às barragens com altura inferior a 15 m que não estejam já incluídas e que apresentem uma albufeira com capacidade superior a 100 000 m<sup>3</sup>.

## **2.4 Estudos e Fatores Críticos a Considerar**

O presente trabalho irá apresentar os estudos e fatores críticos, dentro dos objetivos previamente definidos, no que refere à conceção do projeto, acautelados de acordo com a Lei Portuguesa, no Decreto-Lei nº 344/2007, nomeadamente o artigo 13º (*“Constituição do projeto”*), o artigo 14º (*“Barragem e sua fundação”*) e artigo 16º (*“Albufeira”*).

Segundo o artigo 13º, a constituição do projeto, resumidamente no que diz respeito ao controlo de segurança, deve incluir um estudo geológico, sismológico e geotécnico da região, da zona da albufeira e do local de implantação das obras; assim como estudos dos tipos, das características e das origens dos materiais de construção a utilizar.

Deve também inclui-se no dimensionamento da barragem o projeto de tratamento da sua fundação, pormenorizado no artigo 14º, onde se pode ler no Decreto-Lei nº 344/2007 que deverão ser referidos no projeto as características do local e o esquema geral da obra, bem como os critérios, os modelos e os métodos utilizados no dimensionamento da barragem e da sua fundação, considerando os danos potenciais induzidos pela construção e exploração da barragem, o qual deverá fundamentar a classe atribuída à obra.

O projeto deverá também induzir a geometria da estrutura e as características, propriedades e a previsão do comportamento dos materiais da estrutura e da fundação, nomeadamente nos aspectos hidráulico, mecânico, térmico e químico.

Deverão ser estudadas as ações estáticas e dinâmicas, com as possíveis variações ao longo da vida da barragem e as combinações mais desfavoráveis durante as condições normais de exploração e para ocorrências excecionais.

Deverão ser também identificados no projeto os potenciais cenários de acidente e de incidente que estejam associados à barragem e sua fundação.

Relativamente aos fatores a considerar no estudo da albufeira deverão induzir uma análise das características de impermeabilidade da albufeira e a estabilidade das suas margens.

## **2.5 Pontos a Reter**

São vários os fatores críticos que condicionam a concepção de uma barragem e que conferem características únicas ao empreendimento, nomeadamente, em termos geotécnicos:

- O comportamento dos materiais da estrutura e da fundação da barragem (nomeadamente a existência de fenómenos de liquefação, a caracterização das descontinuidades...);
- As ações estáticas e dinâmicas ao longo da vida da barragem;
- Os potenciais cenários de acidente e de incidente;
- A análise das características de impermeabilidade da albufeira e a estabilidade das suas margens.

### **3 TRABALHOS DE PROSPEÇÃO A REALIZAR PARA O PROJETO DE BARRAGENS DE ATERRO**

#### **3.1 Aspetos Gerais**

A prospeção geotécnica tem como objetivo geral, a obtenção do máximo de informação geológico-geotécnica, incluindo a circulação e piezometria da água nos terrenos, de forma a permitir a caracterização das diversas formações, tanto ao nível da fundação da barragem, como das potenciais áreas de empréstimo.

Esta caracterização das formações geológicas implica a recolha de amostras para ensaios laboratoriais geotécnicos. Outros ensaios são realizados *in situ*.

A definição dos trabalhos de prospeção deve ser precedida por uma recolha bibliográfica de todos os elementos disponíveis e acompanhada por um pormenorizado reconhecimento de campo. Desta forma, a campanha de prospeção preconizada é ajustada consoante o tipo de terreno e suas especificidades.

O objetivo destes trabalhos, que incluem os ensaios *in situ* (permeabilidade, entre outros), será descrito resumidamente no presente capítulo, tendo em conta as suas vantagens e inconvenientes, bem como, a norma portuguesa ou internacional pela qual são regidos.

De acordo com o tipo de barragem de aterro a executar, o programa de prospeção deverá ser ajustado às diferentes necessidades.

No âmbito do presente trabalho, apenas serão abordados os métodos de prospeção habitualmente utilizados e considerados, em Portugal, como essenciais, como é o caso dos ensaios de refração sísmica e *cross-hole*, assim como a execução de sondagens à rotação, sondagens destrutivas ou de roto-percussão, valas/poços, galerias, ensaios *in situ* e medições piezométricas.

Existem outros, como a reflexão sísmica, amplamente usada noutras áreas, que não o estudo geotécnico (por exemplo na indústria petrolífera), mas que começa a ser considerada, e a realização de fotointerpretação de fotografias aéreas em observação estereoscópica.

O método da fotointerpretação, raramente utilizado na prática corrente, permite, através da comparação de fotografias tiradas do mesmo local em épocas diferentes, identificar antigas instabilidades de vertentes, que, por vezes são difíceis de detetar no terreno, bem como outro tipo de estruturas geológicas, nomeadamente falhas e alguns aspetos hidrológicos.

Por vezes, é efetuada uma análise mais expedita através do programa *Google Earth*, que possibilita uma visão numa outra perspetiva, possibilitando identificar alguns processos de carácter regional.

#### **3.2 Ensaios de Refração Sísmica**

Este método de exploração/investigação como objetivo principal a caracterização e zonamento dos terrenos de fundação da barragem e das obras anexas, bem como a avaliação da potencialidade de zonas de exploração de materiais de construção, deduzidos das velocidades de propagação das ondas elásticas. Este método aplica-se pois, a qualquer tipo de maciço, terroso ou rochoso.

Através da informação proporcionada por este método, processada com o auxílio de modelos e programas informáticos apropriados, é possível efetuar a determinação da profundidade do substrato rochoso e obter uma ideia genérica do seu grau de alteração/fracturação, assim como, estimar as espessuras de camadas de alteração ou aluvionares, inferir acerca de estruturas geológicas existentes em profundidade, estipular a caracterização dinâmica das formações e avaliar a sua ripabilidade.

#### Vantagens

Trata-se de um método não-destrutivo, pouco dispendioso e rápido, que necessita de um equipamento apropriado mas de fácil deslocação, que fornece uma informação expedita na espessura mais superficial dos terrenos, podendo atingir ainda assim algumas dezenas de metros.

#### Limitações

É um método indireto que não permite a observação do maciço, além de não possibilitar a recolha de dados em profundidades superiores a um quarto do comprimento total do dispositivo sísmico estendido à superfície. Este método necessita da realização de sondagens para aferição dos dados obtidos.

#### Norma(s) de referência

ASTM D5777-00(2011)e1 – *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*.

### **3.3 Ensaio de *Cross-hole***

O ensaio *cross-hole* permite realizar uma análise mais detalhada do estudo de pequenos volumes de maciço rochoso, consistindo na identificação de estruturas que não são visíveis através da sísmica de superfície.

Apresenta como principais objetivos o estudo pormenorizado na determinação de zonas de rocha fraturada, na localização de zonas de terreno de baixa resistência (principalmente em processos de rotura), na determinação das características elásticas dinâmicas do meio subterrâneo e no zonamento do maciço.

#### Vantagens

Relativamente a outros ensaios sísmicos, as primeiras ondas chegadas aos recetores são normalmente as ondas diretas, e é a partir das ondas sísmicas S que é possível determinar diretamente o Módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

Existe a possibilidade de detetar camadas de baixa velocidade, subjacentes a camadas de velocidade superior.

### Limitações

É necessário realizar dois furos, em que, normalmente é aproveitado um furo de sondagem e é executado um outro furo realizado com perfuração destrutiva, mais económico do que uma sondagem à rotação tradicional. A informação obtida é referente a uma área muito pequena.

### Norma(s) de referência

ASTM D4428 / D4428M - 07 – *Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing*.

## **3.4 Sondagens à Rotação**

As sondagens à rotação permitem uma amostragem contínua em profundidade com o objetivo de estudar o maciço de fundação da barragem e das obras anexas contribuindo para o seu zonamento. Permitem ainda caracterizar as potenciais zonas de pedreira, através da observação direta dos tarolos recolhidos nas formações. Também comporta a identificação com precisão da espessura das camadas aluvionares ou de alteração.

São preferencialmente realizadas em maciços rochosos, sendo porém possível a sua realização em solos, desde que sejam tomadas precauções especiais no que respeita aos problemas de sustentação das paredes do furo e que sejam utilizadas pressões muito baixas do fluido de circulação e velocidades de rotação baixas.

### Vantagens

É possível obter uma informação direta acerca das condições em que se encontram os maciços rochosos, permitindo a caracterização da litologia, orientação de anisotropias penetrativas das rochas (clivagem existente, xistosidade), do grau de alteração e fraturação, percentagem de recuperação e percentagem de *Rock Quality Designation* (RQD) segundo Deere (1989), inclinação e presença de fraturas com indícios de circulação de água, materializados pela presença de depósitos ou incrustações de óxidos de ferro ou de manganês. É ainda possível, recolher amostras indeformadas e, em zonas de maciço terroso, a realização de ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), que avaliam a resistência do maciço. Introduzindo uma sonda no furo de sondagem também é possível determinar o nível de água ocorrente no local.

### Limitações

Trata-se de uma observação pontual que pode não ser representativa do maciço ou não conseguir identificar possíveis singularidades que possam existir neste. Em solos incoerentes de baixa compacidade por vezes a recolha de amostra (sem recorrer a mostradores especiais) é muito dificilmente executada.

### Norma(s) de referência

EN ISO 22475-1:2006 – *Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution*; ASTM D2113-14 – *Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration*.

### 3.5 Sondagens Destrutivas ou de Roto-percussão

Trata-se de um método expedito cujo objetivo principal se prende com a colocação de instrumentação (p. ex. Piezómetros, inclinómetros), realização de ensaios *in situ* (p. ex. ensaios dilatométricos, ensaios de *cross-hole*) ou para a injeção de calda no tratamento da fundação da barragem. Porém esta furação, quando a geologia regional ou local é conhecida, permite estabelecer um perfil de sondagem grosseiro e até o nível de água mais superficial.

#### Vantagens

Trata-se de um método bastante rápido de perfuração, que pode ser utilizado em todo o tipo de rocha. Nos maciços terrosos faz-se a exceção dos solos moles ou não-coesivos.

#### Limitações

Não é possível retirar qualquer informação detalhada, que caracterize com precisão o maciço (como por exemplo o grau de fraturação e o de alteração, a percentagem de recuperação...), apenas a percepção de uma maior ou menor resistência à furação, no caso de não ser instalada instrumentação de captura, registo e tratamento informático dos parâmetros de perfuração.

#### Norma(s) de referência

EN ISO 22475-1:2006 – *Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution.*

### 3.6 Poços/Valas de Reconhecimento

O objetivo da realização de poços de reconhecimento visa a obtenção de informação acerca das várias formações superficiais até, aproximadamente, um máximo de 4 a 5 m de profundidade (limite dependente do alcance do braço da máquina), da espessura da camada vegetal e dos níveis de águas existentes. Estes podem ser realizados nas áreas de empréstimo, como na zona de fundação da barragem e órgãos anexos.

As valas, uma vez que apresentam um comprimento que pode chegar a ser 50 vezes superior aos poços, mas com uma profundidade de 1 a 1,5 m também são utilizadas na recolha de informação da camada mais superficial, que pode corresponder apenas à terra vegetal ou a possíveis níveis de água. No entanto têm como principal objetivo a definição da espessura da camada de alteração do maciço rochoso e o levantamento de descontinuidades existentes neste, aplicável tanto nas áreas de empréstimo como na fundação da barragem e órgãos anexos.

#### Vantagens

São métodos diretos que permitem uma recolha de dados das camadas mais superficiais muito precisa, com possibilidade de colheita de amostras para análise laboratorial. O equipamento utilizado (retroescavadora ou giratória) é frequentemente de fácil aquisição encontrando-se disponível nas proximidades dos locais em estudo e apresentando um custo muito reduzido, quando comparado com o das sondagens. São também métodos muito flexíveis visto que permitem refinar a escolha das zonas a prospectar durante a execução da campanha.



### Limitações

A sua pequena profundidade não permite um estudo das formações que se encontram abaixo do seu limite de escavação e no caso dos poços a informação está restringida ao comprimento à superfície de aproximadamente 2 m. Em caso de ser atingido o nível freático, o avanço do poço é muito limitado devido ao abatimento das paredes.

### Norma(s) de referência

EN ISO 22475-1:2006 – *Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution.*

## **3.7 Galerias**

A abertura de galerias permite uma observação direta das formações dentro do maciço identificando zonas de boa qualidade e potenciais problemas a nível das fundações da barragem, como por exemplo, zonas mais conturbadas ou falhas.

### Vantagens

Permitem o acesso ao interior do maciço, podendo ser posteriormente aproveitadas como galerias de drenagem ou outros órgãos da barragem. Este método possibilita a execução de ensaios *in situ* no seu interior e a sua direção, inclinação e profundidade pode ser alterada no sentido que for mais conveniente para o estudo.

### Limitações

Trata-se de um método dispendioso que pode necessitar de uma escavação/remoção de grandes volumes de maciço e é geralmente de execução morosa.

### Norma(s) de referência

EN ISO 22475-1:2006 – *Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution.*

## **3.8 Ensaios *in situ***

Os ensaios realizados *in situ* têm como objetivo a caracterização do maciço quanto à sua permeabilidade, deformabilidade, resistência e estado de tensão *in situ*.

Acompanham, geralmente, os trabalhos de prospeção mecânica e podem ser efetuados praticamente em simultâneo ou após a execução dos últimos.

Alguns ensaios são realizados quase de forma sistemática, como é o caso dos ensaios de penetração dinâmica ou estática estão associados, em regra, a sondagens executadas em maciços terrosos. Outros, como os ensaios de permeabilidade, de deformabilidade ou de determinação de estado de

tensão, são efetuados apenas quando os trabalhos de prospecção visam esdarecer especificamente estas características, como por exemplo, no caso das fundações de barragens.<sup>1</sup>

### **3.8.1      *Standart Penetration Test (SPT)***

O ensaio SPT tem como objetivo a determinação das condições mecânicas dos solos, ou seja, avaliar a sua resistência à penetração do amostrador normalizado, que pode ser correlacionada com a resistência à compressão uniaxial de solos argilosos e a compacidade de solos arenosos. Este ensaio permite também efetuar uma primeira análise do potencial de liquefação dos solos aluvionares (ver por exemplo, a norma ASTM D1586-11 – *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*).

#### Vantagens

Comparativamente com outros tipos de ensaios de penetração, algumas das suas propriedades mais vantajosas que terão contribuído para a sua grande aplicação são a sua simplicidade operacional, rapidez de execução, recuperação de amostras de solo, baixo custo e elevada experiência acumulada com a sua aplicação (Carvalho, 2002). A sua utilização é possível em todo o tipo de solos e rochas brandas.

Além destas vantagens este método encontra-se amplamente difundido existindo um elevado número de referências bibliográficas sobre a interpretação dos dados. Salienta-se a existência de várias correlações empíricas que têm vindo a ser estabelecidas ao longo do tempo com parâmetros fundamentais de caracterização de ordens de grandeza para a resistência e a deformabilidade do terreno.

#### Limitações

Uma das limitações mais significativas é o reduzido volume de terreno diretamente interveniente no processo de cravação do amostrador (Carvalho, 2002) e a sensibilidade do ensaio à presença de elementos resistentes/grosseiros no terreno, como blocos rochosos isolados, que provocam valores anormalmente elevados e que não são representativos dos solos envolventes.

#### Norma(s) de referência

EN ISO 22476-3:2005 – *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 3: Standard penetration test*.

### **3.8.2      *Ensaio de Piezocone com Medição da Pressão Intersticial (CPTu)***

O ensaio de piezocone com medição da pressão intersticial utiliza-se maioritariamente em zonas de aluvião composto por materiais de baixa compacidade/resistência.

Os seus objetivos prendem-se com a determinação do perfil do solo de fundação da barragem através da avaliação dos parâmetros geotécnicos obtidos, nomeadamente, a resistência de ponta, o atrito lateral e a pressão neutra. É com base nestes dados que se realiza uma avaliação do potencial

---

<sup>1</sup> Retirado e adaptado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_7\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_7_GE.pdf) acedido em 6 de Janeiro de 2015

de liquefação dos solos, bem como a determinação da resistência ao corte não drenado e da permeabilidade hidráulica, entre outros.

#### Vantagens

Trata-se de um ensaio de rápida execução que permite obter um perfil estratigráfico contínuo, com aquisição e processamento automático de dados de alta precisão. Não necessita, normalmente, de pré-furação e provoca uma baixa perturbação no solo.

#### Limitações

Com este ensaio não é possível a obtenção de amostras, tendo a sua capacidade de penetração limitada pela capacidade de carga. É um ensaio realizado apenas em solos, que apresenta dificuldade em manter a verticalidade para profundidades elevadas.

#### Norma(s) de referência

ISO 22476-1:2012 – *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.*

### **3.8.3 Ensaio pressiométrico**

Dentro dos ensaios pressiométricos será apenas tratado o ensaio com pressiómetro de pré-furação ou *Pressiometer Ménard Test* (PMT) por ser o mais comumente utilizado. Este ensaio é realizado em solos finos coerentes moles a muito rijos e solos granulares soltos a muito compactos, permitindo a obtenção de diversos parâmetros, como por exemplo, o módulo distorcional ( $G_0$ ). Desta forma, obtêm-se uma medida contínua do comportamento tensão-deformação dos solos de fundação da barragem e dos órgãos anexos. Este ensaio ainda não é utilizado correntemente em Portugal.

#### Vantagens

Consegue medir a relação tensão-deformação no local, permitindo obter no imediato, os parâmetros que caracterizam o solo.

#### Limitações

A direção de solicitação é radial, num plano horizontal, originando que a determinação dos parâmetros possa sofrer um desvio da realidade, ou seja, pode ocorrer o efeito de anisotropia, além de que os parâmetros de resistência e deformabilidade obtidos não são comparáveis com os resultados conseguidos através de outro tipo de ensaios. Trata-se de um ensaio de delicada realização, que apresenta dificuldades de execução em solos grosseiros e no controle da drenagem, cujos resultados são influenciados pela perfuração.

#### Norma(s) de referência

NF P94-110 (1991) – *Sols: Reconnaissance et Essais – Essai pressiométrique Ménard*;  
ISO 22476-4:2012 – *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Ménard pressuremeter test.*

### 3.8.4 Ensaio dilatométrico

Este ensaio pode ser executado utilizando dois métodos: o ensaio do *Borehole Dilatometer* (BHD), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que se realiza em maciços muito fraturados e em rochas brandas ou deformáveis, obtendo-se o módulo dilatométrico, correlacionável com o módulo de deformabilidade obtido por outros métodos; e o ensaio do dilatômetro de *Marchetti* (DMT) que tem como objetivo a obtenção de diversos parâmetros geotécnicos referentes à resistência, deformabilidade e história de tensões em solos. Ambos os ensaios se aplicam na fundação da barragem e órgãos anexos.

#### Vantagens

O ensaio com o BHD pode ser realizado simultaneamente com a execução das sondagens de prospeção permitindo uma caracterização geotécnica do maciço, efetuando um zonamento em termos de módulos de deformabilidade.

Entre as principais vantagens do ensaio com o DMT, constam a sua padronização internacional e a reprodução de perfis quase contínuos, o que determina um conjunto de parâmetros intermédios que apresentam uma correlação direta com parâmetros geotécnicos.

#### Limitações

O ensaio com o dilatômetro desenvolvido pelo LNEC tem uma utilização muito condicionada em maciços rochosos de baixa resistência, sendo mais adequado para rochas com módulos de deformabilidade elevados (Charrua-Graça, 1979).

Com o ensaio DMT não existe recolha de amostras, além de não se realizar uma medição direta da pressão neutra. Não é possível atravessar formações compostas por elementos grosseiros, nomeadamente blocos ou calhaus. Em ensaios realizados dentro de furos de sondagem executados previamente, surgem problemas relacionados o movimento das varas dentro do furo. É possível ultrapassar esta dificuldade, enchendo o furo, por exemplo, com areia.<sup>2</sup>

Em qualquer dos ensaios podem ocorrer problemas de ajustamento entre os equipamentos e as paredes dos furos. A presença de fraturas quase paralelas e próximas dos furos podem afetar significativamente os resultados.

#### Norma(s) de referência

DMT – ISO/TS 22476-11:2005 – *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 11: Flat dilatometer test*; ASTM D6635-01(2007) – *Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer*. BHD – ISRM: *SM for Deformability Determination Using a Flexible Dilatometer* (1987).

---

<sup>2</sup> Retirado e adaptado de [http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=36:vantagens-e-limitacoes&catid=9:sdmt&Itemid=15](http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=36:vantagens-e-limitacoes&catid=9:sdmt&Itemid=15) acedido em 12 de Janeiro de 2015

### **3.8.5 Ensaio de corte rotativo *in situ* (Vane test)**

Este ensaio tem como principal objetivo estimar a resistência não drenada, de pico e residual, de solos argilosos brandos (argilas muito moles, moles e médias) existentes no leito do rio na zona de fundação das barragens (zonas aluvionares).

#### Vantagens

Trata-se de um ensaio de execução simples e rápida que permite medir diretamente a coesão não drenada e caracterizar argilas sensíveis. Existe um vasto conjunto de bibliografia sobre este ensaio, assim como várias correlações com outros ensaios.<sup>3</sup>

#### Limitações

A sua aplicação está restringida a solos argilosos moles a medianamente duros, onde o comportamento não drenado seja garantido e pode ser realizado dentro de um furo de sondagem a diversas profundidades. Apenas permite avaliar a resistência à coesão não drenada, caracterizando pontualmente o solo.

#### Norma(s) de referência

ISO/DIS 22476-9 – *Ground investigation and testing - Field testing - Part 9: Field vane test*;  
ASTM D2573-01(2007) – *Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil*.

### **3.8.6 Ensaio de permeabilidade *LeFranc***

O ensaio de permeabilidade *LeFranc* é executado em maciços terrosos e tem como objetivo a determinação da permeabilidade dos solos existentes na fundação da barragem e das obras anexas, aproveitando os furos de sondagem para a obtenção de informação em diferentes trechos de profundidade.

#### Vantagens

Este ensaio pode ser realizado a diversas profundidades, o que permite obter o perfil de permeabilidade verticalmente. Apresenta um tempo de execução e custo relativamente baixos.

#### Limitações

O coeficiente de permeabilidade encontrado é afetado pela permeabilidade horizontal e vertical dificultando a interpretação dos resultados. Quanto maior for a homogeneidade e isotropia do maciço, menor significando terá. O ensaio está limitado à zona circundante do furo de sondagem.

É também um ensaio cujos resultados são fortemente dependentes dos cuidados colocados na sua realização, nomeadamente no isolamento e controle dimensional da cavidade a partir da qual é feita a injeção da água no terreno.

---

<sup>3</sup> Retirado e adaptado de [http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=20:vantagens-e-limitacoes&catid=7:fvt&Itemid=13](http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=20:vantagens-e-limitacoes&catid=7:fvt&Itemid=13) acedido em 13 de Janeiro de 2015

#### Norma(s) de referência

ISO 22282-2:2012 – *Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 2: Water permeability tests in a borehole using open systems*; NF P 94-132 (2000) – *Sols: Reconnaissance et Essais - Essai d'eau Lugeon*.

### **3.8.7 Ensaio de permeabilidade Lugeon**

O ensaio de absorção de água *Lugeon* é aplicado em maciços rochosos. Este ensaio permite ter uma estimativa da permeabilidade em trechos a diferentes profundidades, conjuntamente com uma aproximação do grau de fracturação do maciço rochoso subjacente à fundação da barragem e das obras anexas, contribuindo para a conceção do zonamento geotécnico e determinação do tratamento de impermeabilização do maciço através das injeções de calda de cimento.

#### Vantagens

É possível obter informação quanto à permeabilidade, regime de percolação e comportamento das fraturas na zona envolvente ao furo para o trecho ensaiado.

#### Limitações

A principal limitação deste ensaio assenta no facto da informação da permeabilidade recolhida ser apenas referente à zona circundante ao troço do furo onde se realiza.

#### Norma(s) de referência

ISO 22282-3:2012 – *Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 3: Water pressure tests in rock*; NF P 94-131 (1994) – *Sols: Reconnaissance et Essais - Essai d'eau Lugeon*.

### **3.8.8 Ensaio de bombagem**

O objetivo deste ensaio tem como finalidade o estudo hidrogeológico da área em estudo, obtendo-se informações acerca dos parâmetros hidráulicos. Permite também fornecer dados acerca do sistema aquífero em análise, que possibilite avaliar a eficiência da captação. A aplicação prática tem como determinação os caudais a bombear nas grandes escavações.

#### Vantagens

Permite obter uma interpretação realista do regime hidrogeológico numa área bastante abrangente, como seja, caudais, tempo de recuperação e tipo de aquífero(s) (aquiduso, aquitardo...) existente.

#### Limitações

Trata-se de um ensaio longo, que podem durar vários dias, de custo elevado, em que é necessária a execução de um poço de bombagem, com instalação de um grupo de bombagem e de um grupo de piezómetros instalados na zona envolvente.

#### Norma(s) de referência

ISO 22282-4:2012 – *Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 4: Pumping tests*.

### 3.9 Medições Piezométricas

A instalação de um piezómetro e a medição de um nível piezométrico é executada em maciços terrosos ou rochosos e permite estabelecer a carga hidráulica num ponto situado no interior da formação do maciço aquífero, podendo fazer-se uma análise do nível freático ou piezométrico encontrado na zona de fundação da barragem e obras anexas.

Antes da definição da localização dos piezómetros deverá ser efetuado um inventário hidrogeológico na envolvente e o estabelecimento dos níveis freáticos ou piezométricos existentes ou possíveis.

Uma das etapas fundamentais num estudo hidrológico é a execução do denominado Inventário Hidrogeológico (s.l.). Este inventário consiste na localização de todas as nascentes, poços, fontes, furos e minas de água existentes em determinada região, isto é, de pontos de água e obtenção de informação de carácter hidrogeológico em cada um deles (perfil litológico ou situação geológica da captação; posição do nível piezométrico; características químicas da água extraída; volume de água utilizada por unidade de tempo; evolução temporal de alguns dados anteriores; posição geográfica de cada ponto de água; uso da água, estado da conservação da captação; etc...).<sup>4</sup>

#### Vantagens

A grande vantagem do inventário hidrogeológico é o de ser um dos meios mais eficientes de recolha de informação das características hidrogeológicas de uma região sem grandes custos económicos.<sup>4</sup>

#### Limitações

A ocorrência de situações em que, por exemplo, o piezómetro seja vandalizado ou a existência de um problema de má instalação, deslocamento no solo, etc, que impeça a realização das leituras. Os piezómetros de tubo aberto tem inércia em termos de resposta, o que pode afetar os resultados em terrenos de baixa permeabilidade. Este problema pode ser ultrapassado com piezómetros baseados em outros princípios, como os de corda vibrante, muito mais precisos, mas com custos de instalação muitíssimo mais elevados.

#### Norma(s) de referência

ISO 22475-1:2006 – *Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution.*

### 3.10 Pontos a Reter

O presente capítulo teve como objetivo uma breve descrição de alguns dos trabalhos de prospeção mais utilizados nas campanhas de prospeção, resumindo acerca das suas aplicações vantagens e limitações, bem como de exemplos das normas internacionais de referência.

Os trabalhos de prospeção a serem realizados podem recorrer a procedimentos especificados por outras normas internacionais.

---

<sup>4</sup> Retirado e adaptado de [http://www.lneg.pt/download/3312/Capitulo\\_4.pdf](http://www.lneg.pt/download/3312/Capitulo_4.pdf) acedido em 15 de Janeiro de 2015

Em Portugal, dos principais trabalhos de prospeção mais vulgarmente executados em barragens fazem parte os ensaios de refração sísmica, as sondagens à rotação, os poços e valas de reconhecimento, as galerias e as medições piezométricas. Os ensaios *in situ* mais comuns englobam os ensaios *Standart Penetration Test* (SPT), *Cone Penetration Test* com medição da pressão intersticial (CPTu), de permeabilidade *LeFranc* e absorção de água *Lugeon*.



## **4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO A REALIZAR PARA O PROJETO DE BARRAGENS DE ATERRO**

### **4.1 Aspetos Gerais**

O presente capítulo pretende efetuar um resumo dos ensaios de laboratório frequentemente preconizados no plano de prospeção geotécnico de uma barragem de aterro, em conjunto com os seus objetivos e alguns aspetos relevantes como vantagens e limitações.

Antes da realização de qualquer tipo de ensaio deve ser feita a recolha de amostras. Esta amostragem pode ser executada sobre solos, rochas ou água. As amostras de solos e rochas podem ser recolhidas através dos poços e sondagens, enquanto a colheita de águas poderá ser efetuada em piezómetros, poços de água ou linhas de água (ribeiras, rios...).

As amostras de solos podem ser de dois tipos, remexidas ou intactas e a sua quantidade (dimensão) variar, consoante o tipo de ensaios de laboratório a realizar. As mostras remexidas referem-se à situação em que a estrutura, o teor em água e os constituintes do solo foram alterados durante a amostragem. Por sua vez, nas amostras intactas não se verificaram alterações com significado prático nas características do solo, devendo ser acondicionadas de forma a conservá-las.

Todas as amostras devem ser numeradas, registadas e etiquetadas, logo após a sua colheita. Na etiqueta deve ser colocada a informação de identificação do projeto e da amostra, a data e profundidade da amostragem, o método de amostragem e o tipo de amostrador utilizado. Bem como, se aplicável, assinalar o topo e a base da amostra recolhida, acompanhada por uma descrição visual da mesma. Qualquer operação mal-sucedida deverá ser registada.

O tipo de amostrador a utilizar deverá estar adaptado ao tipo de amostra a recolher e às condições do terreno associadas. A colheita de amostras a efetuar deverá ter como norma de referência ISO 22475-1(2006) – *Geotechnical investigation and testing Sampling by drilling and excavation and groundwater measurements Part 1: Technical principles of execution*.

No final, as amostras devem ser acondicionadas em condições adequadas (seladas de forma a manter as suas características) e enviadas para um laboratório especializado e credenciado, com os cuidados exigidos nas especificações.

Numa barragem de aterro os elementos chave a estudar prendem-se com a resistência mecânica, a deformabilidade e a permeabilidade do corpo da barragem e do maciço de fundação. Além do estudo das características físicas e mecânicas dos materiais de construção, nomeadamente os solos finos para o corpo da barragem, as areias e/ou seixos para os filtros ou drenos, os enrocamentos para as proteções e para os agregados ou materiais cimentícios, provenientes das áreas de empréstimo.

Relativamente às condições físicas e químicas da água, nomeadamente a determinação do valor de agressividade ao carbonato de cálcio e do teor em iões agressivos, estes devem ser definidos devido à influência que o nível de água exerce sobre o dimensionamento da barragem e a sua fundação, para além dos condicionamentos decorrentes durante os trabalhos de construção.

## 4.2 Ensaios de Laboratório Sobre Solos

No presente sub-capítulo faz-se uma breve descrição dos ensaios de laboratório em solos, referindo os seus objetivos e alguns aspetos importantes a ter em conta durante a sua realização, como por exemplo, vantagens e limitações.

### 4.2.1 Análises Granulométricas com Sedimentação

A análise das dimensões das partículas é importante pois permite deduzir indicações preciosas, entre outras, sobre a proveniência (designadamente sobre a disponibilidade de determinados tipos de partículas e sobre as rochas que lhes deram origem), sobre o transporte (utilizando, por exemplo, o conceito de maturidade textural e a resistência das partículas, segundo a sua composição, à abrasão e à alteração química) e sobre os ambientes deposicionais (Dias, 2004).

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras (presumivelmente representativas dos sedimentos) e no tratamento estatístico dessa informação. Basicamente, é necessário determinar as dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição, quer pelo peso de cada classe dimensional considerada, quer pelo seu volume, quer ainda pelo número de partículas integradas em cada classe. Na realidade, estas três formas têm sido utilizadas (adaptado de Dias, 2004).

Os objetivos deste ensaio consistem no estudo de materiais de potenciais áreas de empréstimo a utilizar nos diversos constituintes da barragem, como por exemplo, o núcleo, os filtros, os drenos, os maciços estabilizadores, entre outros, consoante as suas características. Assim como, no estudo dos solos da fundação da barragem, de forma a identificar, por exemplo, potenciais zonas de liquefação.

Os resultados deste ensaio, em conjunto com o ensaio dos limites de Atterberg, ensaio do teor em água natural, ensaio do azul de Metileno e ensaio do equivalente de areia, denominados ensaios de identificação, permitem uma classificação dos solos. Nas barragens é normalmente adotada a classificação ASTM (*American Society for Testing and Materials International*) e a classificação do Manual Francês LCPC-SETRA (2000).

Na determinação da análise granulométrica são usados dois métodos dependendo do tamanho das partículas: o método de peneiração, para partículas  $>63\ \mu\text{m}$  (ou o peneiro mais próximo possível) e o método de sedimentação, utilizando um hidrómetro, ou pipeta, para partículas  $\leq 63\ \mu\text{m}$  (ou o peneiro mais próximo possível).

Devem utilizar-se métodos de remoção da matéria orgânica e de carbonatos antes da peneiração e da sedimentação ou métodos de correção para ter em conta esta presença, caso possuam um efeito de cimentação ou floculação e influenciar a curva granulométrica.

Trata-se de um ensaio relativamente simples de executar, que necessita de material facilmente transportado e que não necessita de uma calibragem frequente.

#### **4.2.2 Limites de Atterberg**

Os limites de Atterberg ou de consistência são utilizados para caracterizar o comportamento dos solos argilosos e dos solos siltosos quando o teor em água sofre variações.

Estes solos, quando apresentam maior ou menor quantidade de água, podem comportar-se como líquidos, plásticos ou de comportamento frágil.

O objetivo deste ensaio é a determinação da passagem entre estes comportamentos, à qual se dá o nome de limite de liquidez (LL) (líquido para plástico), limite de plasticidade (LP) (plástico para semi-sólido) e limite de contração ou retração (LC) (semi-sólido para sólido) – limites de Atterberg.

Normalmente são apenas executados os LL e LP e a sua diferença é definida como o Índice de Plasticidade (IP) do solo. Esta característica é muito importante na verificação da potencial utilização de um solo, como material a constituir o corpo da barragem.

O Índice de Consistência (IC) é outro dos parâmetros retirados diretamente da subtração do LL pelo teor natural em água (w), sobre o IP, que dá indicações acerca de potenciais problemas de traficabilidade para valores baixos (intervalo aproximado entre 0 e 1,0) e problemas de extração e compactação para valores altos (aproximadamente 2,0).

Como referido anteriormente, este é um dos ensaios de identificação dos quais depende as classificações dos solos ASTM e LCPC-SETRA (2000).

Como nota, quando se executa o limite de liquidez deve ser especificado o método de ensaio a utilizar (cone de queda ou a concha de Casagrande). O método do cone de queda proporciona resultados mais fiáveis.

Tem como grande vantagem o facto de ser um ensaio amplamente difundido a nível mundial, tornando-o bastante expedito.

Este ensaio é realizado nos solos de fundação da barragem e áreas de empréstimo.

#### **4.2.3 Massa Volúmica / Peso Volúmico / Peso Volúmico das Partículas**

O ensaio para determinar a massa volúmica, ou seja, o grau de compactação de um solo, deve ser interpretado tendo em conta a profundidade do nível freático, a granulometria, a mineralogia, o diâmetro máximo do grão das amostras e a perturbação das amostras recolhidas nas potenciais áreas de empréstimo. A determinação da massa volúmica de um solo grosseiro sob o nível freático é geralmente aproximada, exceto no caso de métodos de amostragem especiais, como, por exemplo, a congelação.

A massa volúmica das partículas é a massa das partículas dividida pelo seu volume. O objetivo de encontrar este valor é o de o utilizar na determinação de vários parâmetros geotécnicos. Estes resultados devem situar-se entre 2500 a 2800 kg/m<sup>3</sup>, caso contrário é necessário fazer uma verificação da mineralogia do solo, da sua matéria orgânica e da sua origem geológica.

A definição de peso volúmico das partículas sólidas de um solo é o peso das partículas que ocupariam a unidade de volume, depois de exduídos os vazios.<sup>5</sup>

#### **4.2.4 Teor em Água Natural**

Em Mecânica dos Solos, o teor em água ( $w$ ) é definido como a relação, expressa em percentagem, entre o peso de água que se evapora do provete por secagem à temperatura de  $105\pm 3^\circ\text{C}$ , e o peso do provete, depois de seco.<sup>5</sup>

Trata-se de um ensaio de simples execução, cujo objetivo consiste em determinar o teor em água do solo recolhido das potenciais áreas de empréstimo. Como tal, deve ter-se especial atenção ao método de amostragem, ao acondicionamento, ao transporte e ao manuseamento, o método de preparação dos provetes e as condições ambientais no laboratório, de forma a conservar as condições da amostra *in situ*.

A determinação deste valor deve a sua importância à definição do estado hídrico do solo (muito seco a muito húmido), quando comparado com o seu teor em água ótimo, e desta forma, a adaptação às condições necessárias à sua compactação, como por exemplo, a humedificação superficial do solo ou a sua secagem, segundo o LCPC-SETRA (2000).

#### **4.2.5 Análise Mineralógica por Difractometria de Raios-X**

A descoberta dos raios-X em 1895 permitiu aos cientistas sondar a estrutura cristalina ao nível atómico. A difração de raios-X (DRX) envolve um conjunto de ondas eletromagnéticas, os raios-X, que são produzidas quando há uma grande aceleração de partículas eletricamente carregadas, que geralmente são os eletrões. Os raios-X ao interagirem com a matéria provocam a sua difração e, cada sólido cristalino tem um padrão único caraterístico, podendo ser usado como uma “impressão digital” na sua identificação (Veiga, 2011).

A DRX é utilizada na identificação, caraterização e determinação da estrutura de minerais, pois cada mineral apresenta um padrão de DRX único. A DRX permite fornecer informação muito útil no estudo dos solos, dando a conhecer a sua composição mineralógica, nomeadamente o tipo de minerais argilosos, uma vez que estes influenciam o comportamento dos solos (Veiga, 2011).

A composição mineral, química e textural dos solos reflete-se nas suas propriedades geotécnicas, nomeadamente, plasticidade, consistência, expansibilidade, permeabilidade, compressibilidade e resistência. A presença de determinados tipos de minerais, em particular minerais argilosos, tende a conferir aos solos maior compressibilidade, menor resistência e maior sensibilidade à água (Veiga, 2001). Este ensaio é realizado nas amostras recolhidas das potenciais áreas de empréstimo, de forma a avaliar o seu potencial uso no corpo da barragem.

No caso do estudo dos solos resultantes da alteração das rochas magmáticas, é possível inferir sobre os graus de alteração e de lixiviação dos mesmos e analisar o seu comportamento evolutivo (Veiga, 2011).

---

<sup>5</sup> Santana & Rodrigues (2005) disponível em <http://run.unl.pt/bitstream/10362/11470/1/CI7%20-%20solos%20IV%20SIACOT%20Out05.pdf> acedido em 17 de Fevereiro de 2015.

A identificação dos minerais nos difratogramas baseia-se na localização dos picos e as determinações semiquantitativas baseiam-se nas áreas e alturas dos mesmos picos. Normalmente tomam-se as alturas do pico das ilites como referência no cálculo das relações entre os vários minerais aos quais se atribuem coeficientes (Veiga, 2011).

#### **4.2.6 Azul de Metileno**

O azul de metileno em solução aquosa é um corante catiónico que é adsorvido pela carga negativa das superfícies das argilas permitindo a determinação da superfície específica pela quantidade de azul de metileno adsorvido (Santamarina *et al.*, 2002). A técnica de realização do ensaio, ao utilizar o solo em suspensão em água, permite a expansão dos minerais de argila e expor toda a sua área disponível. A superfície específica é um parâmetro de identificação de argilas que rege a importância e a atividade dos minerais argilosos, assim como o seu comportamento mecânico (e.g. expansibilidade) (Veiga, 2011).

A técnica do ensaio de adsorção de azul de metileno é simples e confiável para a determinação da superfície específica dos solos, incluindo argilas expansivas. Esta pode ser obtida a partir do volume de azul de metileno adsorvido (VBS) utilizando a equação  $SE=20,93VBS$  (Veiga, 2011).

Este ensaio complementa a classificação dos solos, além de ser bastante relevante em todo o tipo de estudos onde a fração argilosa toma importância. Permite avaliar e controlar o grau de poluição das areias e agregados por argilas (pavimentação e betonagem) (Veiga, 2011).

Este ensaio é realizado nas amostras recolhidas das potenciais áreas de empréstimo, de forma a avaliar o seu potencial uso no corpo da barragem.

#### **4.2.7 Equivalente de Areia**

Este ensaio tem como objetivo quantificar a presença de finos numa areia, através da agitação e lavagem de um provete de ensaio numa solução floculante, de forma a determinar a sua potencial utilização nos filtros da barragem. Após o repouso é definida a relação entre a altura da camada de areia e o somatório desta com a altura de elementos finos. Trata-se de um ensaio de simples execução.

Para uma areia pura este ensaio apresentará um valor de 100%, decrescendo o valor à medida que aumenta o teor de finos. Para uma argila, o valor do ensaio é praticamente nulo (Lamares, 2006).

Este ensaio é realizado nas amostras recolhidas das potenciais áreas de empréstimo, de forma a avaliar o seu potencial uso no corpo da barragem.

#### **4.2.8 Proctor Normal**

O ensaio de Proctor destina-se a fornecer elementos para a caracterização da compactação de um solo. É realizado na construção de barragens de terra, em que existem solos que carecem de ser compactados para aumentar a sua densidade. A compactação diminui a possibilidade de assentamentos e aumenta a estabilidade dos solos (adaptado de Veiga, 2011).

A medição da densidade do solo permite obter a unidade de peso volúmico seco do solo ( $\gamma_d$ ). Quanto maior for a quantidade de sólidos por volume mais denso é o solo e mais resistente e estável. A compactação relativa corresponde à relação (expressa em percentagem) da densidade do solo, compactado ou no estado natural, e a densidade máxima obtida no ensaio de compactação. Muitas vezes é necessário especificar a realização de um certo nível de compactação relativa (por exemplo, 95%) na construção ou preparação dos aterros (adaptado de Veiga, 2011).

Durante o ensaio de Proctor é medido o  $\gamma_d$  e o teor em água ( $w$ ) de vários provetes compactados a teores em água diferentes. Os valores obtidos são projetados num gráfico  $w-\gamma_d$  e é traçada a curva de compactação do solo, que permitirá obter um valor de  $\gamma_{d\text{máx}}$  ao qual corresponde um determinado teor em água considerado como o ótimo da compactação deste solo ( $w_{\text{opt}}$ ) (Veiga, 2011).

Como já foi referido no ensaio do teor em água natural, o ensaio de compactação Proctor Normal determina as condições de compactação a aplicar para cada tipo de solos, dependendo do seu estado hídrico, segundo o LCPC-SETRA (2000).

Este ensaio é realizado sobre os solos das potenciais áreas de empréstimo.

#### **4.2.9      Expansibilidade**

Este ensaio é realizado nas amostras recolhidas das potenciais áreas de empréstimo, de forma a avaliar o seu potencial uso no corpo da barragem.

A expansibilidade pode ser entendida como uma característica dos solos finos argilosos que se traduz numa variação do seu volume na molhagem. É um fenómeno que se manifesta apenas quando ocorre um aumento do teor em água e a sua amplitude traduz o potencial expansivo do solo (Reis, 2010).

A explicação do fenómeno associado à expansibilidade do material é complexa já que essas variações volumétricas estão relacionadas com várias propriedades dos materiais argilosos tais como: a superfície específica, a capacidade de troca catiónica, a natureza dos iões de troca, o grau de consolidação, o teor em matéria orgânica e a presença de agente de cimentação entre partículas (Mitchell & Soga, 2005).

#### **4.2.10      Corte Direto**

O ensaio de corte direto é, particularmente, apropriado para analisar situações em que a rotura é localizada desenvolvendo-se em bandas de corte de reduzida espessura, em estado plano de deformação.<sup>6</sup>

Neste ensaio medem-se os deslocamentos horizontal e vertical através de transdutores LVDT e as forças horizontal e vertical recorrendo a células de carga. Neste ensaio, é difícil (ou mesmo impossível) de calcular, com rigor, as tensões e deformações a partir das grandezas medidas. A distribuição de tensões no plano de corte não é uniforme e desconhecem-se as dimensões da zona de rotura, pelo que as deformações não podem ser determinadas. Na prática, consideram-se

---

<sup>6</sup> Retirado de <http://moodle.fct.unl.pt/pluginfile.php/32330/.../capitulo2-geofisica.pdf> acedido em 17 de Fevereiro de 2015.

simplificadamente as tensões médias instaladas na superfície de rotura (dividindo as forças normal e tangencial pela área transversal do provete).<sup>7</sup>

Ou seja, o ensaio tem como limitações o facto de não permitir controlar ou medir as tensões horizontal e neutra, assim como a drenagem da amostra. Além de, apenas ser possível determinar a tensão no plano de corte, não se conhecendo as tensões das restantes facetas, bem como as tensões principais e respetivas direções.

Entre as suas principais vantagens trata-se de um ensaio rápido e de baixo custo, de fácil preparação de amostras, que pode medir a resistência residual em argilas e, com caixas de corte de tamanho maior, ensaiar materiais de grão grosseiro. Também com algumas modificações é possível, partindo dos mesmos princípios, determinar a resistência de descontinuidades em rocha.

Como nota deve tentar reproduzir-se o mais aproximadamente possível as condições *in situ*, tendo em conta a localização e a orientação do provete.

A velocidade de corte deve ser suficientemente lenta para que as pressões intersticiais da água se possam dissipar, uma vez que não podem ser medidas nem tidas em conta na interpretação dos resultados.

#### **4.2.11 Edométrico**

O ensaio de compressão incremental e de expansão com edómetro têm como objetivos determinar as características de compressão, consolidação e expansão dos solos, avaliando o seu potencial de colapso. Os resultados dos ensaios com edómetro são utilizados para estimar a tensão de pré-consolidação dos solos argilosos e siltosos, avaliando a taxa de assentamentos, no tempo e total, da barragem.

Este ensaio consiste num provete cilíndrico que é confinado lateralmente e é, normalmente, submetido a incrementos discretos de cargas ou descargas axiais verticais, deixando-se drenar axialmente. Como nota, para provetes recompactados, devem ser especificadas a composição, a massa volúmica e o teor em água dos provetes que sejam relevantes para as condições *in situ* e o método de preparação dos provetes.

A interpretação dos resultados dos ensaios com edómetro relativa à compressibilidade é normalmente mais fiável do que a interpretação relativa ao comportamento no tempo e a estimativa da tensão de pré-consolidação deve ter em conta a possibilidade das amostras se encontrarem perturbadas, pois pode sofrer grandes alterações.

Este ensaio tem como desvantagem a duração do tempo, devido à espera necessária que a pressão intersticial leva a ser dissipada e apresenta como vantagens a sua padronização na grande maioria dos países, uma metodologia bem definida na interpretação de resultados, assim como uma simplicidade sua execução.

---

<sup>7</sup> Retirado de <http://moodle.fct.unl.pt/pluginfile.php/32330/.../capitulo2-geofisica.pdf> acedido em 17 de Fevereiro de 2015.

#### **4.2.12 Corte Triaxial**

O ensaio triaxial corrente é utilizado fundamentalmente para caracterizar a resistência dos solos. Quando munido de instrumentos de medição interna de precisão permite caracterizar também a rigidez dos solos.<sup>8</sup>

No que respeita às deformações, estudos recentes, mostram, efetivamente, que os métodos de medição externa no ensaio triaxial tradicional só garantem leituras fiáveis para deformações da ordem de  $10^{-2}$ .

O objetivo deste ensaio consiste em simular, o mais aproximadamente possível as condições de tensão existentes nos maciços terrosos antes e após o carregamento imposto pela construção da barragem e órgãos anexos.

Em questão de vantagens, as tensões aplicadas no ensaio (axial e radial) são tensões principais, não existindo rotação destas durante o corte. O equipamento permite efetuar ensaios em condições drenadas e não drenadas e controlar de forma independente as tensões ou as deformações axial e radial.

O ensaio triaxial pode ser do tipo não consolidado não drenado (UU), consolidado não drenado (CU) e consolidado drenado (CD).

As suas principais limitações prendem-se com a complexidade e o tempo de demora do ensaio.

#### **4.2.13 Dispersividade**

O ensaio da dispersividade é um ensaio qualitativo, cujo objetivo consiste em identificar as características de dispersão dos solos argilosos. Ou seja, a probabilidade de ocorrência da erosão dos sedimentos finos através de um processo, em que, as partículas de argila, individualmente, entram em suspensão em águas praticamente paradas.

Uma das limitações deste ensaio é que, mesmo no caso dos solos serem considerados como não-dispersivos, podem estar sujeitos a erosão em determinadas circunstâncias.

O ensaio não é considerado válido, caso a constituição do solo seja composta por menos de 10% de argila ou o IP seja inferior a 4%.

O ensaio de dispersividade em solos argilosos, é efetuado naqueles que irão constituir o núcleo da barragem.

Consideram-se a adoção de três tipos de métodos (adaptado de BS 1377-5, 1990):

- O ensaio “pinhole”: este ensaio modela a ação da água que corre ao longo de uma fenda ou de um furo;

---

<sup>8</sup> Retirado de <http://moodle.fct.unl.pt/pluginfile.php/32330/.../capitulo2-geofisica.pdf> acedido em 17 de Fevereiro de 2015.



- O ensaio do hidrómetro duplo: este ensaio compara a dispersão de partículas de argila em água simples sem agitação mecânica com a obtida utilizando uma solução dispersante e agitação mecânica;
- A determinação de sais solúveis na água dos poros: este teste permite a correlação entre a percentagem de sódio e a totalidade de sais dissolvidos no extrato de saturação.

#### **4.2.14 Permeabilidade**

O objetivo do ensaio é estabelecer o coeficiente de permeabilidade e/ou de condutividade hidráulica do escoamento de água através de solo saturado com água (adaptado de BS 1377-5, 1990).

Este ensaio é realizado sobre o material que deverá constituir o corpo da barragem.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade de um estrato de solo torna-se relevante atender aos seguintes aspetos (adaptado de BS 1377-5, 1990):

- A conservação das amostras;
- O tipo de ensaio preferível para a determinação da permeabilidade;
- O número de provetes;
- A preparação dos provetes;
- A orientação do provete;
- A necessidade de ensaios de classificação adicionais.

Na análise deve determinar-se (adaptado de BS 1377-5, 1990):

- Em que medida as condições de fronteira (grau de saturação, direção do escoamento, gradiente hidráulico, condições de tensão, peso volúmico e camadas, fugas laterais e perda de carga no filtro e nas tubagens) afetam os resultados dos ensaios;
- Até que ponto estas condições estão de acordo com a situação no terreno.

#### **4.2.15 Análises Químicas**

As análises químicas em solos têm como objetivo a determinação do potencial de agressividade ao betão dos órgãos hidráulicos da barragem. Este ensaio faz o despiste de zonas contaminadas, de origem natural e antropogénica.

De forma a obterem-se as características químicas dos solos as seguintes análises químicas devem realizar-se obedecendo às respetivas normas enumeradas:

- Teor em matéria orgânica
  - BS 1377:1990 *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 3. Chemical and electrochemical tests. Clause 4. Determination of the mass loss on ignition or an equivalent method*;
  - ASTM D2974:1987 *Test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils*.

- Teor em carbonatos
  - BS 1377:1990 *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 3. Chemical and electrochemical tests. Clause 6 Determination of the carbonate content.*
- Teor em sulfatos
  - BS 1377:1990 *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 3. Chemical and electrochemical tests. Clause 5. "Determination of the sulphate content of soil and ground water".*
- Valor do pH (acidez e alcalinidade)
  - BS 1377:1990 *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 3. Chemical and electrochemical tests. Clause 9. "Determination of the pH value".*
- Teor em cloretos
  - BS 812:Part 118: 1988 *Testing aggregates. Methods for determination of sulphate content;*
  - BS 1377:1990 *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 3. Chemical and electrochemical tests. Subclause 7.2 / subclause 7.3.*

### 4.3 Ensaios de Laboratório Sobre Rochas

A rocha intacta é constituída por uma aglomeração mais ou menos compacta de grãos cristalinos e, nalguns casos, matéria amorfa. O termo matriz rochosa poderá ser mais correto uma vez que poderá existir já algum grau de alteração e fracturação nesse aglomerado de grãos. As rochas são assim sólidos policristalinos, descontínuos e que podem exibir uma certa anisotropia derivada de uma orientação preferencial na sua estrutura.<sup>9</sup>

Os ensaios em rocha têm como objetivos avaliar as características da fundação rochosa da barragem e órgãos anexos, bem como o comportamento dos fragmentos rochosos aplicados aos enrocamentos, nomeadamente quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, à sua durabilidade e à estrutura e composição litológica dos maciços provenientes.

À semelhança do subcapítulo 4.2, no presente subcapítulo faz-se uma breve descrição dos ensaios de laboratório em rochas referindo os seus objetivos e alguns aspetos relevantes, como limitações e vantagens.

#### 4.3.1 Porosidade, Peso Volúmico e Absorção de Água

As descontinuidades representam os defeitos ou vazios existentes no meio contínuo formado pelos minerais constituintes da matriz rochosa. A presença e o desenvolvimento destes vazios estão estreitamente relacionados com a deformação e a rotura das rochas.<sup>9</sup>

Estes ensaios são denominados como ensaios das propriedades índice e refletem a caracterização física da rocha.

---

<sup>9</sup> Retirado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_3\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf) acedido em 18 de Fevereiro de 2015.

A porosidade de uma rocha ( $n$ ) é a fração que expressa a proporção de espaços vazios em relação ao volume total da rocha, ou seja, o volume de poros acessíveis à água em relação ao volume total da rocha (adaptado de LNEC, 1995). Trata-se de um parâmetro expresso, normalmente, em percentagem e considera, aproximadamente 10%, como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor elevado.

Peso volúmico ou peso específico ( $\gamma$ ) é o peso da unidade de volume da rocha. Atendendo à variabilidade da quantidade de água presente na rocha considera-se o peso volúmico seco ( $\gamma_d$ ) da rocha como um parâmetro mais representativo.<sup>10</sup>

A quantidade de água na rocha pode ser quantificada pelo teor em água ( $w$ ) que é a razão entre o peso da água presente numa determinada amostra e o seu peso seco. O peso volúmico da rocha é, por esse motivo, muito variável.<sup>10</sup>

Estes ensaios são realizados tanto nos tarolos de sondagem colhidos na zona de fundação da barragem e obras anexas, como nas pedreiras cujo material será utilizado no enrocamento.

#### **4.3.2 Índice de Fragmentabilidade**

O ensaio de fragmentabilidade tem por objetivo encontrar o Coeficiente de Fragmentabilidade, FR, o qual é dado pela razão entre o  $D_{10}$  de 2 kg de material de granulometria 10/20 ou 40/80, dependendo da litologia, antes e após compactação com 100 pancadas com o pilão do Proctor Leve em molde CBR (adaptado de Luzia *et al.*, 2000). Quando  $FR \leq 7$  a rocha é considerada pouco fragmentável, enquanto que se  $FR > 7$  então a rocha será fragmentável.

Trata-se de um ensaio expedito, de fácil realização, mas de alcance limitado (adaptado de LNEC, 1995).

Este ensaio é aplicado ao material que irá constituir o enrocamento da barragem.

#### **4.3.3 Índice de Degradabilidade**

O objetivo do ensaio de degradabilidade é determinar o Coeficiente de Degradabilidade, DG, o qual é obtido através da razão entre o  $D_{10}$  de 2 kg de material de granulometria 10/20 ou 40/80, dependendo da litologia, antes e após o mesmo ser submetido a um conjunto de quatro ciclos de secagem-molhagem (adaptado de Luzia *et al.*, 2000). Quando o  $DG \leq 5$  o material rochoso é pouco degradável, se o  $DG > 20$  o material rochoso é muito degradável e, no caso de  $5 < DG \leq 20$  então o material rochoso será degradável.

Este ensaio é especialmente recomendado para rochas brandas e é aplicado ao material rochoso que compõe o enrocamento da barragem.

---

<sup>10</sup> Retirado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_3\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf) acedido em 18 de Fevereiro de 2015.

#### **4.3.4 Ensaio de Abrasividade Cerchar**

O ensaio de abrasividade *Cerchar* (*Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France*) foi desenvolvido pelo centro de pesquisas homónimo, em meados da década de 1970 (adaptado de West, 1981).

Consiste fundamentalmente numa ponta metálica de dimensões e de material específicos, sob a carga de 70 N, com a qual se efetua um risco de 10mm de extensão num provete de rocha, verificando-se o desgaste dessa ponta. O resultado do ensaio, expresso sob o Índice CAI (*Cerchar Abrasiveness Index*), corresponde à medida do diâmetro da área plana da ponta metálica (em décimas de milímetro), oriunda do desgaste (adaptado de Ribeiro, 2010).

Este ensaio tem como objetivo avaliar o desgaste do material de escavação que é utilizado na construção de uma parede moldada, na fundação rochosa da barragem.

#### **4.3.5 Expansibilidade**

A durabilidade é avaliada em ensaios de laboratório, como o ensaio de expansibilidade. Este ensaio avalia a suscetibilidade de uma rocha aumentar de volume na presença de água, fenómeno associado à porosidade e à percentagem de minerais argilosos.<sup>11</sup>

Para o ensaio de expansibilidade faz-se a imersão em água durante 48 horas de provetes, previamente secos, medindo-se com um defletómetro a variação do seu comprimento, sendo os resultados calculados pela relação entre essa variação e o comprimento inicial do provete (Pinto *et al.*, 1995).

Este ensaio é realizado sobre o material rochoso a utilizar no enrocamento da barragem.

#### **4.3.6 Desgaste em Meio Húmido (*Slake-Durability Test*)**

Este ensaio, concebido para rochas brandas, pretende avaliar a resistência da rocha ao enfraquecimento e desintegração, quando submetida a vários ciclos-padrão de desgaste em meio húmido (Pinto *et al.*, 1995).

A amostra seca é introduzida num tambor metálico com malha de 2 mm, que, por sua vez, é colocado numa tina e ligado a um moto. A tina é cheia de água até a um nível abaixo do eixo do tambor, que sofre ciclos com um número especificado de rotações (20 r.p.m durante 10 minutos); após secos e pesados a amostra e o tambor, o ciclo é repetido (Pinto *et al.*, 1995).

O índice de desgaste em meio húmido (*Slake Durability Test*),  $I_{d2}$ , é a relação entre o peso da amostra seca após o 2º ciclo de ensaio e o seu peso inicial, sendo o resultado apresentado em percentagem (Pinto *et al.*, 1995).

---

<sup>11</sup> Retirado de [http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S\\_Geotecnia/Fundamentos\\_Geotecnia/3\\_rochas\\_solos.pdf](http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Geotecnia/Fundamentos_Geotecnia/3_rochas_solos.pdf) acedido em 19 de Fevereiro de 2015.

Segundo Rodrigues (1986) e Rodrigues *et al.* (1994) para rochas de moderada a alta resistência, o desgaste ocorrido é muito baixo, considerando-se útil o aumento da duração do ensaio, utilizando-se por isso o resultado do sétimo ciclo de desgaste,  $I_{d7}$ .

Este ensaio é aplicado ao material rochoso que compõe o enrocamento da barragem.

#### **4.3.7 Desgaste Los Angeles**

O objetivo deste ensaio é o de determinar a resistência ao desgaste de um material usando a máquina de *Los Angeles*. Esta máquina, de forma cilíndrica, suporta no seu interior o material a ser ensaiado, bem como um determinado número de esferas. O ensaio prossegue pelo movimento de rotação, completando um número de voltas, previamente determinado, sofrendo o material em ensaio, ação de desgaste.<sup>12</sup>

Antes e após o ensaio de desgaste é realizada uma análise granulométrica. Essas análises granulométricas são comparadas em termos de percentagem retida no peneiro nº12 ASTM, verificando-se assim a perda de massa dos agregados.

Este ensaio é utilizado como indicador da durabilidade dos materiais/resistência das partículas, que constituem o enrocamento da barragem, cujo objetivo é a quantificação da perda de desgaste, em percentagem, referente ao peso inicial dos provetes ensaiados.

#### **4.3.8 Compressão p/ Carga Pontual (*Point Load*)**

O objetivo do ensaio de carga pontual é fornecer um índice de resistência dos materiais rochosos, embora possa ser usado para estimar outros parâmetros de resistência, como a compressão uniaxial, com o qual se relaciona. É de fácil execução e baixo custo e pode realizar-se no campo ou em laboratório (Pinto *et al.*, 1995).

Noutras situações em que não se verifica a altura de provete necessária à realização do ensaio de compressão uniaxial também é possível optar-se pela execução do ensaio de carga pontual.

Este ensaio é executado segundo a norma ISRM (1985), sobre provetes regulares e irregulares. O procedimento de ensaio consiste, basicamente, em levar um provete à rotura por compressão exercida entre duas ponteiros cónicas de dimensões normalizadas (Pinto *et al.*, 1995).

Em rochas isotrópicas, em geral são necessários 10 ensaios válidos por cada tipo/qualidade de rocha que se pretende caracterizar, mas um número inferior poderá ser suficiente se a dispersão de resultados for pequena. Com 10 ensaios, para calcular o valor representativo da resistência à carga pontual, é usual eliminarem-se os dois resultados mais elevados e os dois mais baixos, após o que se determina a média com os restantes 6 valores.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> Adaptado e retirado de <http://civiltek.do.sapo.pt/download/relatorios/Materiais%201-1relatorio.pdf> acedido em 19 de Fevereiro de 2015.

<sup>13</sup> Retirado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_3\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf) acedido em 18 de Fevereiro de 2015.

#### 4.3.9 Resistência ao Esmagamento

Muitas vezes, apenas se dispõe de partículas que compõem o agregado e então determina-se a resistência do conjunto das partículas por exemplo através do ensaio de compressão confinada designado por ensaio de esmagamento.<sup>14</sup>

Embora não haja uma relação bem determinada entre o resultado do esmagamento de fragmentos de rocha e o de compressão da rocha, os valores obtidos pelos dois critérios são sensivelmente concordantes.<sup>14</sup>

Também, Marsal e Resendiz (1975) indicam que se verifica uma boa correlação entre os resultados dos ensaios de *Los Angeles* com os de resistência ao esmagamento das partículas.

Genericamente, o ensaio consiste em colocar uma quantidade de material retido num peneiro específico determinado pela norma, num molde cilíndrico. Seguidamente é utilizada uma máquina de compressão, onde o molde se encontra confinado entre dois pratos. Aplicam-se forças de componente normal, gradualmente crescentes e posteriormente realiza-se um descarregamento.

Novamente esta amostra é passada pelo mesmo crivo e determinada a relação de material “perdido” para a fração mais fina.<sup>14</sup>

Segundo Pinto *et al.* (1995) ensaiam-se pelo menos 10 provetes previamente preparados e secos ao ar. Quando se pretende quantificar a influência de água neste parâmetro, realiza-se o mesmo ensaio em mais 10 provetes, após submersão em água durante um período igual ou superior a 24 horas.

Este ensaio foi desenvolvido para o estudo de materiais a utilizar em barragens de enrocamento e o seu objetivo é submeter os elementos rochosos a tensões, que se procura que sejam semelhantes às verificadas nos enrocamentos (Pinto *et al.*, 1995).

#### 4.3.10 Compressão Simples ou Uniaxial

A resistência à compressão uniaxial é o mais corrente dos ensaios mecânicos diretos, e permite uma medida simples da resistência da rocha. Para a realização deste ensaio, é recomendado o uso de vários provetes de geometria regular (no mínimo três por amostra), talhados com uma relação L/D (L – comprimento, D – diâmetro) entre 2 e 2,5. O ensaio consiste em submeter os provetes a uma carga axial até ser atingida a rotura (Pinto *et al.*, 1995).

Este ensaio pode ser realizado sobre provetes secos ao ar e provetes submersos em água durante 24 horas, com a finalidade de se determinar a influência da água na diminuição da resistência (adaptado de Pinto *et al.*, 1995).

Mais concretamente, este ensaio permite determinar a resistência uniaxial não confinada da rocha ( $\sigma_c$ ) e as suas constantes elásticas: módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Determina a resistência e a deformabilidade da rocha (adaptado de Vallejo *et al.*, 2004).

---

<sup>14</sup> Adaptado e retirado de [http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica\\_20022003/JSC\\_126a155.pdf](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_126a155.pdf) acedido em 19 de Fevereiro de 2015.

Os provetes são, normalmente, retirados de tarolos recolhidos em sondagens. A preparação da amostra deve ter um cuidado especial na retificação da superfície das bases que irão sofrer compressão para garantir uma forma cilíndrica perfeita.<sup>15</sup>

O comportamento da rocha é normalmente não reversível, o que significa que a deformação sofrida pela amostra nunca poderá ser recuperada na totalidade se houver uma descarga. As rochas brandas são as que exibem maior deformabilidade, sobretudo no início do carregamento.<sup>15</sup>

Este ensaio é realizado na zona de fundação da barragem e obras anexas e no material rochoso que constituirá o enrocamento.

#### **4.3.11 Ensaio Brasileiro**

O ensaio consiste em medir a resistência à tração de um provete de rocha, assumindo que a rotura se produz por tração quando a rocha se submete a um campo de forças biaxial, com uma ação principal tracional e outra compressiva, de magnitude não superior a três vezes à tracional (Gomes, 2011).

Aplica-se uma carga vertical compressiva sobre um disco ou cilindro de rocha, situada horizontalmente entre duas placas, através das quais se transmite solicitações compressivas até se atingir a rotura. Podem-se usar placas planas ou esféricas côncavas, para transmitir as ações, que deverão ser perfeitamente paralelas (Gomes, 2011).

A resistência à tração deduzida deste ensaio, é em regra, superior à determinada em ensaio de tração simples (Rocha, 1973).

Este ensaio é realizado na zona de fundação da barragem e obras anexas e no material rochoso que constituirá o enrocamento.

#### **4.3.12 Micro-Deval**

O ensaio consiste em medir o desgaste por abrasão e choque (fricção) das partículas do agregado (10/14 mm) e uma carga abrasiva num tambor rotativo, em dadas condições. O desgaste é medido pelo coeficiente *Micro-Deval* que corresponde à percentagem da amostra original de agregado que passa no peneiro de 1,6 mm. Assim quanto menor for o coeficiente *Micro-Deval*, maior será a resistência ao desgaste do agregado e, em princípio, maior será a sua resistência mecânica (adaptado de Hewlett, 1998).

Existem agregados que são mais suscetíveis à abrasão estando molhados do que quando se encontram secos. O uso de água neste ensaio engloba esta redução de resistência à degradação, em contraste com outros ensaios que utilizam agregado seco (adaptado de ASTM D6928-10).

Este ensaio é útil na deteção de mudanças nas propriedades do agregado produzido, como parte do processo de controlo de qualidade (adaptado de ASTM D6928-10).

---

<sup>15</sup> Retirado e adaptado de [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_3\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf) acedido em 18 de Fevereiro de 2015.

Este ensaio é realizado sobre o material rochoso constituinte do enrocamento da barragem.

#### **4.3.13 Deslizamento de Diaclases**

A técnica de ensaio de deslizamento de diaclases, habitualmente seguida, consiste, fundamentalmente, na aplicação de forças normais e de forças tangenciais às superfícies da diaclase (Gama *et al.*, 2002).

Essas forças são produzidas por dois sistemas independentes, instalados em adequada estrutura metálica rígida. Para a aplicação desta técnica, as amostras possuem forma prismática, de maneira a garantir uma distribuição uniforme das forças normais e tangenciais, que lhes são transmitidas no ensaio (Gama *et al.*, 2002).

Nos casos em que as dimensões das amostras são suficientes, são talhados provetes prismáticos; nos casos em que são reduzidas as dimensões das amostras (uma grande parte), as mesmas são encabeçadas com argamassa de cimento. Estas operações são bastante trabalhosas e morosas e, no caso do encabeçamento, antes do ensaio, há que aguardar o tempo suficiente para o endurecimento (da ordem de 7 dias) (Gama *et al.*, 2002).

O objetivo deste ensaio tem em conta que a resistência que uma descontinuidade oferece ao deslizamento é traduzida pelos parâmetros de resistência ao corte segundo essa superfície, ou seja, é encontrar a coesão aparente ( $c_a$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) (adaptado de Pinho, 2003).

Este ensaio é realizado sobre os provetes recolhidos na zona da fundação da barragem e dos seus órgãos anexos.

#### **4.3.14 Velocidade de Propagação das Ondas Elásticas**

A realização deste ensaio permite medir a velocidade das ondas elásticas longitudinais ( $V_p$ ) e transversais ( $V_s$ ), ao atravessar, tanto provetes rochosos secos, como saturados. A velocidade das ondas está relacionada com as características mecânicas do material, assim como a sua resistência e deformabilidade, a partir da qual se calculam os módulos de deformabilidade elásticos dinâmicos  $E_d$  e  $\nu_d$  (adaptado de Vallejo *et al.*, 2004). A rede de fissuras do provete potencia a diminuição do valor das velocidades.

O valor de  $E_d$  é maior do que o determinado a partir dos ensaios de compressão uniaxial, devido à rápida aplicação de esforços de baixa magnitude, que originam que a rocha tenha um comportamento puramente elástico (adaptado de Vallejo *et al.*, 2004).

O valor de  $V_p$ , além de ser correlacionado linearmente com a deformabilidade da rocha, é indicativo da sua qualidade, ao estar relacionado com as propriedades da porosidade e da resistência à compressão uniaxial (adaptado de Vallejo *et al.*, 2004).

A sua principal vantagem prende-se com o facto de ser um ensaio não destrutivo, em que os provetes podem ser utilizados para posteriormente executar ensaios de compressão uniaxial.

Este ensaio é realizado sobre o material rochoso recolhido na zona de fundação da barragem e órgãos anexos.



#### 4.3.15 Análise Petrográfica

Previamente à realização de uma análise petrográfica, é necessário reproduzir lâminas delgadas representativas do material rochoso a estudar que irá fazer parte da composição do betão dos órgãos anexos.

O principal objetivo da análise petrográfica prende-se com a definição da reatividade nos agregados, baseando-se na sua percentagem em sílica.

Como forma de complementar o exame petrográfico com dados quantitativos, pode ser acoplado ao microscópio um contador de pontos automático.

#### 4.3.16 Reatividade do Tipo Álcalis-Sílica

A Reação Álcalis-Sílica (RAS) tem sido uma das causas de origem química de degradação do betão. A manifestação desta patologia surge sob a forma de fendilhação. É um tipo de reação expansiva interna que reduz consideravelmente a durabilidade do betão.<sup>16</sup>

A origem deste problema está na reação entre o cimento e os agregados. Assim, se se juntar agregados reativos com cimento de alcalinidade elevada, na presença de humidade, existe grande probabilidade de ocorrer a RAS. Sendo RAS a formação de um gel interno expansivo.<sup>16</sup>

O objetivo deste ensaio determina se o material a analisar se considera ou não reativo, e é realizado sobre o material rochoso que irá fazer parte da composição do betão dos órgãos anexos.

### 4.4 Ensaios de Determinação da Agressividade da Água

Com o objetivo de analisar o potencial de reatividade/agressividade ao betão das águas existentes deverão ser realizados os seguintes ensaios respeitando as normas identificadas seguidamente.

- Determinação do pH - ASTM D1293:2012 *Standard test methods for pH of water*;
- Determinação do teor em sulfatos - ASTM D516:2011 *Standard test method for sulfate ion in water*;
- Determinação da condutividade eléctrica - ASTM D1125:1995 (2009) *Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water*;
- Determinação de sólidos totais em suspensão - ASTM D1888:1978 *Methods of test for particulate and dissolved matter in water*;
- Determinação de sólidos totais dissolvidos - ASTM D1888:1978 *Methods of test for particulate and dissolved matter in water*;
- Determinação de carbonatos e bicarbonatos - NP EN ISO 9963:2000 Qualidade da água. Determinação da alcalinidade. Parte 1: Determinação da alcalinidade total e da alcalinidade composta;
- Determinação da agressividade ao carbonato - NP EN ISO 9963:2000 Qualidade da água. Determinação da alcalinidade. Parte 2: Determinação da alcalinidade dos carbonatos.

---

<sup>16</sup> Disponível em <http://www.engenhariapt.com/2011/03/26/reacao-alcalis-silica/> acedido em 20 de Fevereiro de 2015.

Para o efeito deve recorrer-se a um laboratório especializado e credenciado.

#### 4.5 Normas/Especificações dos Ensaios de Laboratório

A Tabela 4.1 resume a lista de normas e especificações a cumprir para cada um dos respetivos ensaios de laboratório, que foram abordados nos sub-capítulos 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Ensaios de laboratório e respetivas normas

ENSAIO A REALIZAR	NORMAS DE REFERÊNCIA
<b>Ensaio de laboratório sobre solos</b>	
Análises granulométricas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E 196:1966. Especificação LNEC. Solos. Análise granulométrica por peneiração e sedimentação</li> <li>- E 239:1970. Especificação LNEC. Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida</li> <li>- ASTM D2217:1985. <i>Wet preparation of soil samples for particle size analysis and determination of soil constants</i></li> <li>- ASTM D422:1963. <i>Test method for particle-size analysis of soils</i></li> </ul>
Limites de consistência (LL e LP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP 143:1969. Solos. Determinação dos limites de consistência</li> <li>- ASTM D 4318. <i>Test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils</i></li> </ul>
Teor em água natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP 84:1965. Solos. Determinação do teor em água</li> <li>- ASTM D 2216:2005. <i>Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass</i></li> </ul>
Determinação da densidade das partículas sólidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP 83:1965. Solos. Determinação da densidade das partículas</li> <li>- ASTM D854:1992. <i>Test method for specific gravity of soils</i></li> <li>- ASTM D4404:1984. <i>Determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry</i></li> </ul>
Análise mineralógica por Difractometria de Raios-X	- Equipamento a ser utilizado: Difractómetro de RX – Philips PW 1050 com software X'Pert System (XRD – Pro-Fit) – Philips; Mufla; Almofariz automático de Ágata; Prensa para confeção de pastilhas prensadas
Valor do Azul de Metileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NF P 94-068 :1998. <i>Sols: Reconnaissance et essais – Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache</i></li> <li>- ASTM C 837:1999. <i>Standard test method for methylene blue index of clay</i></li> </ul>
Equivalente de areia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E 199:1967. Especificação LNEC. Solos. Ensaio de equivalente de areia</li> <li>- BS EN 933-8:2012. <i>Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Sand equivalent test</i></li> </ul>
Proctor normal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E 197:1966. Especificação LNEC. Solos. Ensaio de compactação</li> <li>- ASTM D 698. <i>Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (600 kN. m/m<sup>3</sup>)</i></li> </ul>
Ensaio de expansibilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E 200:1967. Especificação LNEC. Solos. Expansibilidade</li> <li>- BS 1377:1990 <i>Methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests. Clause 7. Determination of frost heave</i></li> </ul>
Ensaio de expansibilidade c/ determ. da pressão de expansão nula em câmara edométrica ou ensaio de determ. do potencial de expansibilidade	- BS 1377:1990 <i>Methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests</i>

ENSAIO A REALIZAR	NORMAS DE REFERÊNCIA
Ensaio de corte directo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- BS 1377:1990 <i>Methods for test for soils for civil engineering purposes Part 7 Shear strength test</i></li> <li>- ASTM D 3080:1990 <i>Test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions</i></li> </ul>
Ensaio edométrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- BS 1377:1990 <i>Methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests</i></li> <li>- ASTM D 2435:1996 <i>Test method for one-dimensional consolidation properties of soils</i></li> </ul>
Ensaio de corte triaxial (CU+U) (provetes)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D 4767:11 – <i>Test Method for Consolidated – Undrained triaxial compression test on cohesive soils</i></li> <li>- BS 1377:1990 <i>Methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 8</i></li> </ul>
Ensaio de dispersividade	- BS 1377:1990 <i>Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests; Clause 6. Determination of Dispersibility</i>
Ensaio de permeabilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D 2434:68 (2006) – <i>Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)</i></li> <li>- BS 1377:1990. <i>Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 5. Compressibility, permeability and durability tests</i></li> </ul>
<b>Ensaio de laboratório sobre rochas</b>	
Generalidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D 4543:1985. <i>Preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances</i></li> <li>- BS 5930:1981. <i>Code of practise for site investigation. Section 8, description and classification of rocks for engineering purposes</i></li> <li>- ISRM, 1981. <i>Suggested methods for rock characterisation, testing and monitoring, Part I Site characterization</i></li> </ul>
Porosidade, massa volúmica e absorção de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP EN 1097-6:2001. <i>Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água</i></li> <li>- ISRM <i>Part 1 Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, Section 2: Suggested method for porosity/density determination using saturation and calliper techniques</i></li> <li>- ISRM <i>Part 1 Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties. Section 3: Suggested method for porosity/density determination using saturation and buoyancy techniques</i></li> </ul>
Índice de fragmentabilidade	- NF P 94-066:1992. <i>Sols: Reconnaissance et Essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux</i>
Índice de alterabilidade / degradabilidade	- NF P 94-067:1992. <i>Sols: Reconnaissance et Essais – Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux</i>
Expansibilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISRM <i>Suggested Methods For Determining Swelling and Slake-Durability Index Properties. Test 1: "Suggested Method for Determination of the Swelling Pressure Index of Zero Volume Change"</i></li> <li>- ISRM <i>Suggested Methods For Determining Swelling and Slake-Durability Index Properties. Test 2: "Suggested Method for Determination of the Swelling Strain Index for a Radially Confined Specimen with Axial Surcharge"</i></li> <li>- ISRM <i>Suggested Methods For Determining Swelling and Slake-Durability Index Properties. Test 3: Suggested Method for Determination of the Swelling Strain Developed in an Unconfined Rock Specimen</i></li> </ul>

ENSAIO A REALIZAR	NORMAS DE REFERÊNCIA
Slake-Durability Test (desgaste em meio húmido)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D4644-87: 1998. <i>Standard test method for Slake durability of shale and similar weak rocks</i></li> <li>- ISRM <i>Suggested methods for rock characterisation, testing and monitoring, Part 2, Suggested methods for determining swelling and Slake-durability index properties</i></li> </ul>
Desgaste Los Angeles (desgaste material rocha)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP EN 1097-2:2002. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Métodos para determinação de resistência à fragmentação (Ensaio de Los Angeles)</li> <li>- ISMR, 1978. <i>Determining hardness and abrasiveness of rocks, Part 2, Determining the resistance to abrasion of aggregate by use of the Los Angeles Machine</i></li> </ul>
Compressão p/ carga pontual <i>Point Load</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISRM, 1985. <i>Suggested method for determining point load strength; revised version has been published in International Journal for Rock Mechanics. Min. Sci. &amp; Geomech. Abstr. Vol 22, No. 2, pp. 51-60</i></li> </ul>
Resistência ao esmagamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP 1039:1974. Inertes para argamassas e betões. Determinação da resistência ao esmagamento</li> <li>- E 154. Especificação LNEC. Agregados. Determinação da resistência ao esmagamento</li> <li>- BS 812:1990. <i>Testing Aggregates: Part 110 - Method of determination of the aggregate crushing value Marsal-Resendiz</i></li> </ul>
Compressão simples ou uniaxial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D 2938:1991. <i>Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens</i></li> <li>- ISRM 1979. <i>Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs. 16(2), pp. 135-140</i></li> </ul>
Ensaio Brasileiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISRM, 1978. <i>Suggested method for determining tensile strength of rock materials, Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test</i></li> </ul>
<i>Micro Deval</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NP EN 1097-1:2002. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (<i>Micro-Deval</i>)</li> <li>- ASTM D6928:2010. <i>Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the micro-Deval apparatus</i></li> </ul>
<i>Cerchar</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NF P 94-430-1 (2000): <i>Détermination du pouvoir abrasif d'une roche. Partie 1 – Essai de rayure avec une pointe</i></li> <li>- ASTM D7625 – 10: <i>Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method</i></li> </ul>
Deslizamento de diaclases	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISRM, 1974. <i>Determining shear strength. Part 2, Laboratory determination of direct shear strength</i></li> </ul>
Análise petrográfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- E 415 Inertes para argamassas e betões. Determinação da reatividade potencial com os álcalis. Análise petrográfica, LNEC, 1993</li> <li>- E 461 Betões. Metodologias para prevenir reações expansivas internas, LNEC, 2007</li> <li>- ASTM C295-12 <i>Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete</i></li> <li>- RILEM <i>Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates –Petrographic method Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 36, August-September 2003, pp 480-496; Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 33, June 2000, pp 283-293</i></li> </ul>

ENSAIO A REALIZAR	NORMAS DE REFERÊNCIA
Velocidade de propagação das ondas elásticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM D2845-08. <i>Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock</i></li> <li>- ISRM, 1978. <i>Determining sound velocity</i></li> </ul>
Reatividade do tipo álcalis-silica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM C1260 - 07 <i>Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)</i>, ASTM Volume 04.02 <i>Concrete and Aggregates</i>, October 2012</li> <li>- RILEM AAR-2 e AAR-3 - RILEM TC 106-AAR: <i>Alkali-Aggregate Reaction - Recommendations, Materials and Structures/Matériaux et Constructions</i>, Vol. 33, June 2000, pp 283-293</li> <li>- ASTM C1293 - 08b <i>Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction</i>, ASTM Volume 04.02 <i>Concrete and Aggregates</i>, October 2012</li> <li>- RILEM AAR-4 - RILEM TC 191-ARP: <i>Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity - RILEM Recommended Test Method AAR-0: Detection of Alkali-Reactivity Potential in Concrete- Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity, Materials' and Structures / Matériaux et Constructions</i>, Vol. 36, August-September 2003, pp 472-479.</li> </ul>

Esta lista de normas refere-se a uma compilação das mais utilizadas em Portugal, no entanto podem ser consideradas outras normas internacionais que estejam em vigor.

#### 4.6 Pontos a Reter

No presente capítulo pretendeu-se efetuar uma breve descrição de alguns dos ensaios de laboratório mais utilizados nas campanhas de prospeção, em conjunto com os seus objetivos e alguns aspetos relevantes como vantagens e limitações, referindo-se alguns exemplos das normas/especificações nacionais e internacionais de referência.

Relativamente a este ponto, é possível recorrer a outros procedimentos especificados, através de normas emitidas por outras entidades reconhecidas internacionalmente.



- 5 ANÁLISE, AVALIAÇÃO E GESTÃO DO RISCO EM FASE DE PROJETO
- 6 *CHECKLISTS*
- 7 CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DE MOAMBA-MAJOR





## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho pretendeu fazer uma síntese sobre três aspetos principais na execução de um projeto de barragem de aterro:

- Um resumo acerca dos principais trabalhos de prospeção e ensaios de laboratório preconizados no plano de prospeção geotécnico;
- Uma *checklist* referente aos principais ensaios de laboratório geológico e geotécnico em função das especificidades de cada perfil tipo de barragem de aterro;
- Uma proposta de análise de risco a realizar sistematicamente na fase de projeto sobre os principais fatores críticos numa barragem de aterro.

Pretendeu-se assim juntar num único documento os principais tópicos de âmbito geológico e geotécnico a considerar no projeto de uma barragem de aterro, o que se julga ser um elemento de consulta útil no âmbito do projeto de barragens.

A proposta de análise e gestão de risco apresentada tem como vantagens a tomada de consciência dos pontos fracos do projeto e a definição de medidas mitigadoras em avanço. A maior limitação deste tipo de proposta reside no facto de as avaliações serem de carácter subjetivo, como em grande parte das análises de risco.

No que respeita a trabalhos académicos futuros propõe-se o acompanhamento e o estudo de um número representativo de avaliações e gestão do risco na fase de projeto de barragens de aterro, com o objetivo de registar as mais valias conseguidas com este procedimento, bem como, o estudo da gestão do risco geológico e de como pode ser partilhado este risco entre os vários intervenientes:

- O Dono de Obra;
- O Projetista;
- O Empreiteiro.

Este último aspeto trata-se de um tema de grande interesse, permitindo encontrar estratégias para lidar com o “imponderável” de um risco de cariz “natural” como é o risco geológico, o que poderá ser de grande interesse para os Donos de Obra.

Complementarmente, num diferente tipo de abordagem mais objetivo sugere-se a criação de grelhas de critérios que incluam por exemplo, altura da barragem, volume de armazenamento, natureza, extensão e homogeneidade do substrato de fundação, estruturas geológicas, densidade espacial da prospeção, profundidade da prospeção e grau de homogeneidade das formações, identificando zonas de baixa resistência ou de elevada permeabilidade.



## 9 BIBLIOGRAFIA

Afonso, C. 2006. Impacte Ambiental da Barragem de Poilão [em linha]. Instituto Superior de Educação. Cabo Verde. Disponível em <http://portaldoconhecimento.gov.cv/bitstream/10961/281/1/Impacte%20Ambiental%20da%20Barragem%20de%20Poil%C3%A3o.pdf> acedido a 13 de Janeiro de 2015.

Almeida, A. 2001. “Curso de Exploração e Segurança de Barragens”. Instituto da Água (INAG). Pp 7-1 a 7-110. Lisboa.

Apontamentos de Geofísica. 2003. Ensaios de Caracterização em Solos, Capítulo 2 [em linha]. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Disponível em <http://moodle.fct.unl.pt/pluginfile.php/32330/.../capitulo2-geofisica.pdf> acedido a 17 de Fevereiro de 2015.

Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia [em linha]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Disponível em [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/ge\\_apontamentos.htm](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/ge_apontamentos.htm) acedido a 12 de Outubro de 2014.

Apontamentos da Disciplina de *Applied Hydraulics* [em linha]. *San Diego State University - College of Engineering*, San Diego. Disponível em [http://parra.sdsu.edu/roberston\\_chapter06.html](http://parra.sdsu.edu/roberston_chapter06.html) acedido a 12 de Outubro de 2014.

Apontamentos de Materiais de Construção I [em linha]. Universidade do Minho. Disponível em <http://civiltek.do.sapo.pt/download/relatorios/Materiais%201-1relatorio.pdf> acedido a 19 de fevereiro de 2015

Armstrong, M. 2003. “Risk Management Plan for the EMD Project”. Raytheon Company. Upper Marlboro, Maryland.U.S.A.

ASTM-American Society for Testing and Materials International. Disponível em <http://www.astm.org/> acedido a 14 de Janeiro de 2015.

Baptista, M. L. P. 2008. “Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro”. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Bliss, J., Rushton, K. 1984. “The reliability of packer tests for estimating the hydraulic conductivity of aquifers. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology”, Vol. 17, pp. 81-91. *The Geological Society of London*. London.

BS 1377-5: 1990. *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 5: Compressibility, permeability and durability tests; Clause 6. Determination of Dispersibility. British Standard Institution*. London.

Carvalho, J. M. 2002. “Modelação e Tratamento Geoestatístico de Dados SPT e Sísmicos”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Carvalho, S. R. L. 1989. “Ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí”. COOPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Charrua-Graça, J. G. 1979. “Dilatometer Tests in the Study of the Deformability of Rock Masses”. *Proceedings of the 4th International Congress Rock Mechanics, ISRM*. Montreux.

Clayton, C.R.I. 2001. “Managing geotechnical risk: improving productivity in UK building and construction”. Thomas Telford.

Coba. 2010a. “Prospecção Geotécnica Complementar e Levantamentos Topográficos (Síntese)” – Documento privado.

Coba. 2010b. “Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroeléctrico de Salamonde” – Documento privado.

Coba. 2012. “Barragem de Moamba-Major. Estudo Base”. – Documento privado.

Coba. 2013. “Barragem de Moamba-Major. Estudo Base”. – Documento privado.

Coba. 2014. “Programa de Prospecção Geotécnica e Ensaio Complementar”. – Documento privado.

Coelho, S. 1996. “Tecnologia de Fundações”, E.P.Gustave Eiffel. Lisboa.

Coutinho, J. 2002. Ciência de Materiais – 1ª Parte [em linha]. Disponível em [http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica\\_20022003/JSC\\_126a155.pdf](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_126a155.pdf) acedido a 19 de fevereiro de 2015

Deere, D. 1989. “Rock quality designation (RQD) after twenty years”. *U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1*, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS (67).

Dias, J. .2004. “A Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas Marinhos” [livro electrónico]. Disponível em: [http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb\\_Sediment.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html) acedido a 17 de Fevereiro de 2015.

Ensaio de Penetração Dinâmica SPT – Vantagens e Limitações. [em linha]. Disponível em <http://www.engenhariacivil.com/ensaio-penetracao-dinamica-spt-vantagens-limitacoes> acedido a 9 de Janeiro de 2015.

Ensaio *In Situ*. Apontamentos de Geologia de Engenharia [em linha]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_7\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_7_GE.pdf) acedido a 13 de Janeiro de 2015.

Ensaio Sísmicos [em linha]. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. Disponível em [http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/ensaio\\_sismicos](http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/ensaio_sismicos) acedido a 12 Outubro de 2014.

Ensaio. Laboratório de Geotecnia [em linha]. Universidade de Coimbra. Disponível em <http://www.dec.uc.pt/~ppinto/AltoRabagao/ensaio1.htm> acedido a 10 de Janeiro de 2015.

Fernandes, M. M. 1994. “Mecânica dos Solos”. Volume I. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Gadaio, J. 2012. “Estudo da consolidação em solos areno-siltosos com recurso à célula de Rowe. Comparação com ensaios edométricos tradicionais”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Gama, C. Pereira, H. Sousa, M. 2002. “Método Expedito para Determinação das Características de Corte de Rochas e de Deslizamento de Diaclases”. 8º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.

Geofísica Aplicada à Detecção da Contaminação do Solo e das Águas Subterrâneas [em linha]. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. São Paulo. Disponível em [http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/areas\\_contaminadas/anexos/download/6200.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/areas_contaminadas/anexos/download/6200.pdf) acessado a 6 Janeiro de 2015.

Gomes, R. 2011. “Contributo para a Caracterização Geotécnica dos Gabros da Faixa Beringel-Beja”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. 2005. “Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale”, *Geomorphology*.

Hewlett, P. 1998. “Lea's Chemistry of Cement and Concrete”. Butterworth Heinemann Ed. Arnold, U.K.

<http://moodle.fct.unl.pt/pluginfile.php/32330/.../capitulo2-geofisica.pdf> acessado a 17 de Fevereiro de 2015.

ICOLD. 1998. “ICOLD Guidelines on Risk Assessment for Dams”.

ICOLD. 1993. “ICOLD Rock Foundations for Dams”.

ISO-*International Organization for Standardization*. Disponível em <http://www.iso.org/iso/home.html> acessado a 14 de Janeiro de 2015.

ISRM-*International Society for Rock Mechanics*. Disponível em <https://www.isrm.net/> acessado a 14 de Janeiro de 2015.

Lamare, M. 2006. “Relatório de Estágio sobre Marcação CE em Agregados: Estudo Comparativo Entre as Novas Normativas Europeias e os Métodos de Ensaio Definidos nos Actuais Cadernos de Encargos”. Laboratório Central, Mota-Engil Engenharia e Construção, S.A. Faculdade de Engenharia do Porto. Porto.

Lança, R. 1997. “Tipologia, Condicionantes e Ações em Barragens de Aterro”. Escola Superior de Tecnologia. Universidade do Algarve. Faro. Disponível em <http://w3.ualg.pt/~rlanca/piac/piac-03-tipo-accoes.pdf> acessado a 8 de Julho de 2013.

LCPC-SETRA. 2000. “Réalisation des remblais et des couches de forme”. *Guide Technique*. 2<sup>ème</sup> Edition.

Luzia, R. Santos, L. Quaresma, L. 2000. “Materiais Xistosos. Aplicabilidade em Pavimentos Rodoviários”. 1º Congresso Rodoviário Português. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Manual do Software Aquifer Test. [em linha]. Schlumberger. Disponível em [http://www.swstechnology.com/help/aquifertest/index.html?lugeon\\_tests.htm](http://www.swstechnology.com/help/aquifertest/index.html?lugeon_tests.htm) acessado a 13 de Janeiro de 2015.

Marsal, R. e Resendiz, D. 1975. “*Presas de Tierra y Enrocamiento*”. Editorial Limusa. México.

Materiais Didáticos para a Cadeira de Prospeção Geotécnica. [em linha]. Universidade de Aveiro. Disponível em [http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com\\_content&view=section&id=7&Itemid=10](http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=section&id=7&Itemid=10) acessado a 9 de Janeiro de 2015.

Mitchell, J., Soga, K. 2005. “Fundamentals of Soil Behavior”. 3<sup>rd</sup> Edition. John Wiley & Sons.

Monteiro, B. e Rodrigues J. D. 1994. “Método sugerido para a determinação do ensaio de desgaste em meio húmido (Slake Durability Test)”. LNEC. Lisboa.

Nunes, S. 2010. Caracterização e Zonamento Geotécnico Preliminar de Circuitos Hidráulicos – Aproveitamento Hidroeléctrico de Padroselos [em linha]. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Disponível em [http://run.unl.pt/bitstream/10362/4050/1/Nunes\\_2010.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/4050/1/Nunes_2010.pdf) acessado a 13 de Janeiro de 2015.

Quintela, A.C., 1990. “Apontamentos da Disciplina de Estruturas Hidráulicas”, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571942296/Folhas\\_barragens\\_equipamentos.PDF](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571942296/Folhas_barragens_equipamentos.PDF) acessado a 6 de Julho de 2013.

Pinho, A. B. 2003. “Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos de Baixa Resistência – O Flysch do Baixo Alentejo”. Universidade de Évora. Évora.

Pinto, A. V. 1978. “Características de Resistência e Deformabilidade dos Materiais de Enrocamento”. Seminário 235 – Enrocamentos. LNEC. Lisboa.

Pinto, A. V.; Monteiro, B.; Ferreira, M. Q. e Rodrigues J. D. 1995. “Propriedades e classificações dos materiais de enrocamento.” LNEC. Lisboa.

Permeâmetro. Apontamentos. Laboratório de Automação de Museus, Bibliotecas Digitais e Arquivos do Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro [em linha]. Disponível em [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13449/13449\\_3.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13449/13449_3.PDF) acessado a 13 Janeiro de 2015.

Propriedades Índice e Classificação das Rochas. Apontamentos de Geologia de Engenharia. [em linha]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_3\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf) acessado a 18 de fevereiro de 2015.

Ramos, V. Silva, A. Fernandes, I. Noronha, D. 2012. “Reatividade Potencial aos Álcalis em Agregados Graníticos Portugueses - Caracterização Petrográfica *versus* Ensaios de Expansibilidade”. Encontro Nacional de Betão Estrutural – BE 2012 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Reis, A. 2010. “Comportamento Hidro-Mecânico de um Solo Compactado com Diferente Teor em Água e Mesmo Índice de Vazios. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Ribeiro, V. 2010. “Abrasividade Pendular e a Resistência Mecânica das Rochas”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Robertson, A. 2003. “Safety Audit & Risk Management of Tailing Dams”.

Robertson, A. Shaw, S. “Mine Closure”, [livro electrónico]. Disponível em <http://www.infomine.com/library/publications/docs/e-book%202%20mine%20closure.pdf> acedido a 10 de Janeiro de 2015.

Rocha, M. 1973. “Mecânica das Rochas”. LNEC. Lisboa

Rodrigues J. D. 1986. “Contribuição do estudo para as rochas carbonatadas e sua classificação geotécnica”. LNEC. Lisboa. Relatório Interno, pp. 1-45.

RSB. 2007. Regulamento de Segurança de Barragens, Decreto Lei n.º 344/2007 de 15 de Outubro. 2007. Diário da República. Lisboa. Imprensa Nacional-Casa da Moeda.

Santamarina, J., Klein, K., Wang, Y., & Prencke, E. 2002. “Specific surface: determination and relevance”. *Canada. Geotechnical. Journal*, 39(1): 233-241, 10.1139/t01-077.

Santana, T. e Rodrigues, P. 2005. “Ensaios de Caracterização Laboratorial de Solos com Vista à sua Utilização em Arquitectura de Terra Crua”. IV SIACOT – Seminário Ibero-Americano de Construção em Terra. Monsaraz. PROTERRA/CdT. Disponível em <http://run.unl.pt/bitstream/10362/11470/1/CI7%20-%20solos%20IV%20SIACOT%20Out05.pdf> acedido a 17 de Fevereiro de 2015.

Santos, R. N. C. 2006. “Enquadramento das Análises de Riscos em Geotecnia”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

*US Department of the Interior Bureau of Reclamation*. 1987. “Design of Small Dams”. *Water Resources Technical Publication*. 3<sup>rd</sup> edition, US Government Printing Office.

Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. e Oteo C. 2004. “Ingeniería Geológica”. 2<sup>da</sup> Ed. Pearson-Prentice Hall. Madrid.

Varnes, D. J. 1984. “Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice”. UNESCO, Paris.

Veiga, A. 2011. “Caracterização Geotécnica dos Terrenos do Vale Tifónico Parçeiros-Leiria”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra.

West, G. 1981. “A Review of Rock Abrasiveness for Tunneling”. *Proceeding of the International Symposium of Weak Rocks*. Tokyo. Balkema, Rotterdam.

[www.aboutcivil.org/embankment-dams-types.html](http://www.aboutcivil.org/embankment-dams-types.html) acedido a 12 de Outubro de 2014.